

**ÓPTIMA DETERMINACIÓN DE POTENCIA PARA ABASTECER LA
DEMANDA EN EL MEDIANO PLAZO A TRAVÉS DE SUBASTAS INVERSAS
DE ENERGÍA USANDO PROGRAMACIÓN LINEAL (LP)**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

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

**TEMA:
ÓPTIMA DETERMINACIÓN DE POTENCIA PARA ABASTECER LA
DEMANDA EN EL MEDIANO PLAZO A TRAVÉS DE SUBASTAS INVERSAS
DE ENERGÍA USANDO PROGRAMACIÓN LINEAL (LP)**

**AUTOR:
KEVIN RAÚL YÁNEZ SÁNCHEZ**

**TUTOR:
JORGE PAÚL MUÑOZ PILCO**

Quito, septiembre 2020

Kevin Raúl Yáñez Sánchez

ÓPTIMA DETERMINACIÓN DE POTENCIA PARA ABASTECER LA DEMANDA EN EL MEDIANO PLAZO A TRAVÉS DE SUBASTAS INVERSAS DE ENERGÍA USANDO PROGRAMACIÓN LINEAL (LP)

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2020

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



Kevin Raúl Yáñez Sánchez (Y'1994-M'10). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio Cristiana Kyryos. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se fundamenta en el desarrollo de modelo de optimización para abastecer la demanda eléctrica en el mediano plazo a través de subastas inversas de energía.

kyanezs@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Ing. 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

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
©2020 Universidad Politécnica Salesiana
QUITO - ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Jorge Paul Muñoz Pilco declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*ÓPTIMA DETERMINACIÓN DE POTENCIA PARA ABASTECER LA DEMANDA EN EL MEDIANO PLAZO A TRAVÉS DE SUBASTAS INVERSAS DE ENERGÍA USANDO PROGRAMACIÓN LINEAL (LP)*” realizado por Kevin Raúl Yáñez Sánchez, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito D.M., septiembre de 2020



Jorge Paúl Muñoz Pilco

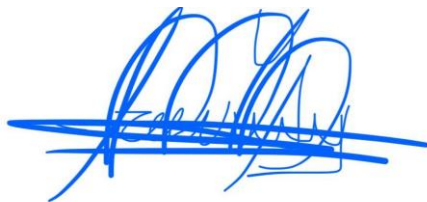
C.C.: 1719006189

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Kevin Raúl Yánez Sánchez, con documento de identificación N°1722974936, 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: “*ÓPTIMA DETERMINACIÓN DE POTENCIA PARA ABASTECER LA DEMANDA EN EL MEDIANO PLAZO A TRAVÉS DE SUBASTAS INVERSAS DE ENERGÍA USANDO PROGRAMACIÓN LINEAL (LP)*”, 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., septiembre de 2020



.....

Kevin Raúl Yánez Sánchez

C.C.: 1722974936

1. ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Marco teórico	4
2.1	Planificación de la expansión de generación	4
2.1.1	Planificación en un largo plazo	5
2.1.2	Planificación a mediano plazo	6
2.1.3	Planificación de corto plazo.....	6
2.1.4	Planificación de expansión de generación: Situación en el Ecuador.	7
2.2	Mercado eléctrico: situación del Ecuador.....	8
2.2.1	Subastas de energía eléctrica.....	9
2.2.2	Subastas de electricidad: situación en el Ecuador	11
3	Modelo matemático	12
3.1	Consideraciones generales	12
3.2	Formulación matemática.....	13
3.2.1	Función objetivo.....	13
3.2.2	Restricción para asignación de producto	14
3.2.3	Restricción para asignación de paquetes	14
4	Implementación del Modelo Matemático	14
4.1	Parámetros del modelo	14
4.2	Procedimiento de resolución.....	15
4.3	Caso de estudio	15
5	Análisis de resultados	19
6	Conclusiones	21
6.1	Trabajos futuros.....	22
7	Referencias.....	22
7.1	Matriz de Estado del Arte	25
7.2	Resumen de Indicadores	29

2. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema general sobre subasta	4
Figura 2. Incertidumbre y riesgos de la PEG.	5
Figura 3. Estrategias de PEG en Ecuador	7
Figura 4. Modelo del mercado eléctrico del Ecuador	9
Figura 5. Mecanismo de subasta inglesa multiproducto.	10
Figura 6. Subasta holandesa de varios bienes.	10
Figura 7. Subasta Pay-As-Bid	11
Figura 8. Subasta de precio uniforme para varios bienes	11
Figura 9. Proyección de usuarios por grupo de consumo	15
Figura 10. Proyección de la demanda de energía por grupo de consumo.....	16
Figura 11. Participación de distribuidoras en la proyección de energía	16
Figura 12. LCOE globales de las nuevas tecnologías de generación de energía renovable 2010 -2019	17
Figura 13. Energía a ser abastecida a la demanda por parte de los proyectos de generación seleccionados de la subasta.	20
Figura 14. Valoración económica resultado de la subasta combinatoria.	21
Figura 15. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.....	29
Figura 16. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.	30
Figura 17. Indicador de solución - Estado del arte.	30

3. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de subastas.....	9
Tabla 2. Algoritmo del Modelo de optimización.	15
Tabla 3. Energía asignada por empresa de distribución.....	16
Tabla 4. Proyectos de generación.	16
Tabla 5. Precios Máximos para proyectos de generación.	17
Tabla 6. Paquetes por ofertante.	18
Tabla 7. Precio y Energía por paquete.	18
Tabla 8. Asignación de Ofertantes y Paquetes.	19
Tabla 9. Asignación energética para la demanda.	19
Tabla 10. Producción energética de los proyectos de generación asignados.	20
Tabla 11. Valor máximo a pagar por energía producida.....	20
Tabla 12. Valor a pagar por energía producida – Modelo de subasta.	20
Tabla 13. Matriz de estado del arte.....	25

ÓPTIMA DETERMINACIÓN DE POTENCIA PARA ABASTECER LA DEMANDA EN EL MEDIANO PLAZO A TRAVÉS DE SUBASTAS INVERSAS DE ENERGÍA USANDO PROGRAMACIÓN LINEAL (LP)

Resumen

El abastecimiento de la demanda eléctrica es instantánea y surge automáticamente cuando lo requiere el consumidor; aspecto por el cual el parque generador debe estar listo para cumplir este requerimiento, sin embargo, una capacidad insuficiente de generación conlleva a la escasez, mientras que una capacidad excesiva de generación no aprovechada causa efectos negativos a nivel económico; por consiguiente es de gran importancia el establecimiento de mecanismos que permitan la incorporación óptima de centrales de generación en base a la planificación a mediano plazo, pues las decisiones que se tomen implican la afectación de recursos, con posibles riesgos económicos para el usuario y la economía en general.

En este sentido, el presente trabajo elabora un modelo de optimización el cual será resuelto mediante GAMS y determina, través de subastas de bloques de energía, la combinación de generadores que abastecerán la demanda en el mediano plazo, analizando como caso de estudio el sistema eléctrico ecuatoriano.

Palabras Clave: Consumo de energía, Planificación del sistema de generación, Recursos energéticos, Economía de sistemas de potencia, Fuentes de energía renovables, oferta y demanda.

Abstract

The supply of electricity demand is instantaneous and automatically when required by the consumer; As a result, the generating park must be ready to meet this requirement. However, insufficient generation capacity leads to a shortage, while an excessively unused generation capacity causes negative economic effects; therefore, the establishment of mechanisms that enable the optimal incorporation of generation plants based on medium-term planning is of great importance, since the decisions taken imply the allocation of resources, with possible economic risks for the user and the economy.

In this sense, this work elaborates an optimization model which will be solved by GAMS and determines, through energy block auctions, the combination of generators that will supply demand in the medium term, analyzing the Ecuadorian electrical system as a case study.

Keywords: Energy consumption, Power generation planning, Energy resources, Power system economics, Renewable energy sources, Supply and demand.

1 Introducción

Los países en desarrollo tienen dentro de sus principales preocupaciones la adquisición eficiente de recursos nuevos de generación, para garantizar la construcción oportuna de capacidad de generación y que ésta cumpla con aspectos de confiabilidad, seguridad y mínimo costo.

En la solución del problema antes descrito, la teoría de subastas ha desempeñado un papel importante. Desde la década de 1990, el uso de subastas de contratos a largo plazo para adquirir nueva capacidad de generación de forma competitiva y transparente ha generado gran atención, especialmente de proveedores del sector privado, inversionistas, gobiernos y agencias multilaterales [1]. Por otro lado, las subastas proporcionan, además, certidumbre de suministro a medio y largo plazo. Cuando la competencia es factible, las subastas resultan ser un mecanismo eficaz para atraer a los actores citados anteriormente, sin embargo, a pesar de tener una moderada competencia en mercados relativamente pequeños, pueden obtenerse beneficios por el uso de las subastas [2].

Como ya se mencionó, la ejecución de la subastas resulta de la necesidad del abastecimiento de la demanda en el mediano y largo plazo, para lo cual es necesario que el sector eléctrico de un país realice una planificación a través de la cual identifique los proyectos de generación a ser subastados y los montos de energía a ser contratados, esta información es sumamente importante, ya que la misma determinará aspectos técnicos y económicos en relación a la tarifa a usuario final y el equipamiento futuro del parque de generación.

La planificación de los sistemas eléctricos considera de forma

significativa el aporte energético y su impacto en el desarrollo económico, cuyo objetivo es definir una estrategia de minimizar los costos para la expansión de los sistemas de generación, transmisión y distribución adecuados para atender a la carga pronosticada en el mediano y largo plazo, tomando en cuenta condiciones técnicas, económicas y políticas [3].

Para determinar la planificación es necesario tener en cuenta la situación técnico - económico actual y futura en el cual debe desarrollarse el sector eléctrico, lo que permite conocer los recursos disponibles y los precios del combustible los que se encuentran en relación con la política energética de cada país; así mismo, se debe considerar que al pronosticar la demanda debe observarse la política actual y previsible de desarrollo económico; las tasas de interés; a más de incluir la fiabilidad aceptable orientada hacia el futuro del sistema eléctrico[4].

Para el caso que compete y analiza el presente estudio, los resultados más relevantes de la planificación son los relativos a la expansión de los proyectos de generación y el abastecimiento de la demanda futura, estos parámetros permitirá al Estado determinar la temporalidad en la que deberá ingresar los proyectos de generación para abastecer la demanda y su crecimiento. En este punto, el modelo de mercado y los mecanismos de inserción de nueva generación juegan un papel relevante para incorporar la nueva generación oportunamente, siendo uno de los mecanismos, las subastas de energía, las cuales serán ejecutadas en función a las políticas estatales.

Entre los tipos más comunes de diseños de subasta utilizados en el sector energético son: subasta de oferta sellada, subasta de reloj descendente, subasta híbrida, subasta combinatoria y subasta de dos lados [5], para el análisis del presente

trabajo se basa en el uso de las subastas combinatorias. En las subastas combinatorias, los oferentes pueden realizar ofertas en diferentes combinaciones de los productos para adquirir nueva capacidad de generación, estas combinaciones son denominadas "paquetes" [1].

Debido a las complementariedades o los efectos de sustitución entre los diferentes productos, los oferentes tienen preferencias para entregar algún producto en particular, sino para un conjunto de productos. Por esta razón, la eficiencia económica se mejora si se permite a los oferentes pujar por paquetes compuestos de diferentes combinaciones [6]. El problema de identificar el conjunto de ofertas que se aceptará, generalmente se ha denominado problema de set covering y puede formularse mediante un problema de optimización lineal entero. Las subastas combinatorias que utilizan programas de optimización lineal entera han sido realizadas con éxito en Latinoamérica [7].

En México, según [8], el cual corresponde al manual de subastas de largo plazo, establece el programa de optimización de enteros mixtos utilizado en las subastas para evaluar las ofertas, mismas que son realizadas para potencia, energía y certificados de energía libre, estos se denominan productos, adicional, se definen zonas eléctricas e interconexiones entre ellas debido al tamaño del sistema, la función objetivo se enfoca en maximizar la cantidad vendida de cada producto multiplicada por el precio máximo de compra ofertada para dicho producto, menos la cantidad de cada paquete de productos comprados multiplicada por el precio de oferta para dicho paquete.

Por su parte en Guatemala, a través de [9] se efectúa la evaluación de las Ofertas Económicas y Adjudicación, cuya

metodología determina la forma en que adjudica al conjunto de ofertas utilizando un modelo de optimización cuya función objetivo es obtener el menor costo de suministro para los usuarios del servicio de distribución final, de cada una de las distribuidoras del conjunto de ofertas presentadas, en el modelo matemático se incorpora una oferta virtual, como una planta de generación con un costo alto, la cual será suficiente para cubrir la totalidad de la demanda establecida en las Bases en caso de que las ofertas no sean suficientes.

En el caso de Chile, [10] señala que por medio de un procedimiento heurístico todos los contratos se asignan por medio de un mecanismo de oferta sellada combinatoria de objetivos múltiples que busca minimizar los costos y maximizar la cobertura de la demanda; una vez obtenida la oferta de los generadores de un precio específico y un monto de energía para cada contrato demandado, culmina el proceso.

Dado que el mecanismo de subastas ha ido perfeccionándose con el transcurso de tiempo, [11] señala que la subasta combinatoria de unidades múltiples tiene algunos elementos que pueden, en tal sentido se propone aplicar algunos mecanismos de aproximación para subastas dinámicas de electricidad para la asignación de energía eléctrica cuando se trata de fuentes de energía sostenibles. Por su parte [12], realiza un Análisis comparativo de la aplicación de la teoría de juegos a varios tipos de subastas en mercados eléctricos, a fin de determinar las estrategias individuales de unidades generadoras, utilizando un enfoque de teoría de juegos no cooperativo e información incompleta sobre varios tipos de subastas.

En [13] muestra la aplicación de una subasta secuencial de oferta sellada al precio de la energía eléctrica mediante el uso de programación lineal, a fin de que

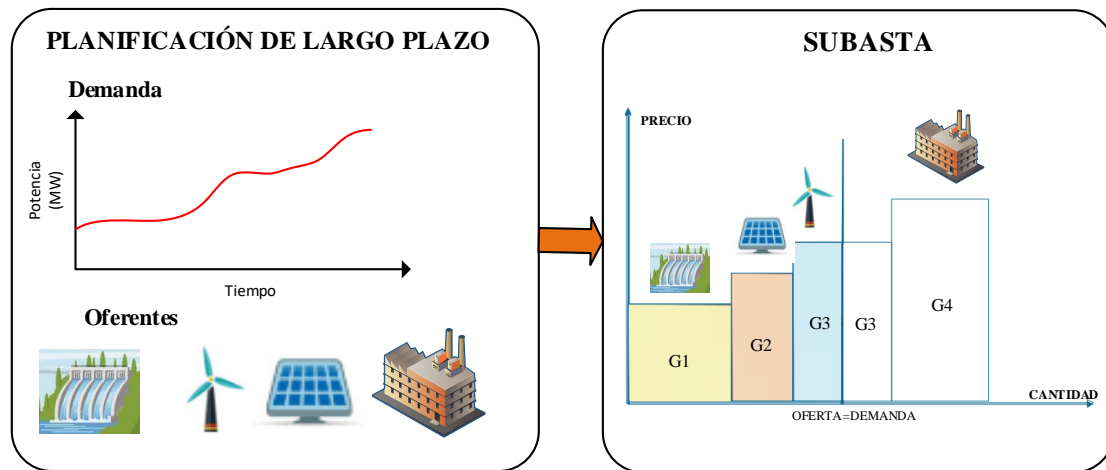


Figura 1. Esquema general sobre subasta

los precios de energía para el usuario final sea estable en el largo plazo, logrando así una menor volatilidad del precio en el mercado spot.

Con base a los descrito, en este trabajo se desarrolla un modelo matemático de programación lineal en el cual se incluirá variables binarias para efectuar subastas inversas de tipo combinatorio para bloques de energía definidos en la planificación del Sistema Eléctrico Ecuatoriano, decidiendo entre diferentes paquetes (ofertas) cuales son activados para cubrir las demandas energéticas de las empresas de distribución, tomando en el beneficio económico para el Estado.

El presente trabajo de investigación se encuentra ordenado de la siguiente forma: i) Sección 2 contiene el marco teórico dirigido a las subastas de energía y planificación del sector eléctrico; ii) La Sección 3 describe el modelo matemático que sustenta la aplicación de subastas combinatorias; iv) La Sección 4 presenta implementación del modelo matemático; v) La Sección 5 expone los análisis de resultados; y, en la parte final se detallan las conclusiones y trabajos futuros.

2 Marco teórico

2.1 Planificación de la expansión de generación

La capacidad y los costos del suministro de energía proveniente de fuentes renovables y no renovables, así como el crecimiento de la demanda son variables que deben ser consideradas y estudiadas de manera óptima, para que el recurso de energía eléctrica sea generado, transmitido y distribuido al consumidor final de forma segura, confiable y económicamente accesible. Por ende, la planificación desde la generación hasta la distribución es esencial, en la operación como en la expansión del sistema. Frente al crecimiento de la demanda el sistema de potencia se ve afectado y debe reestructurarse para ser capaz de abastecer a la carga en aumento, frente a este evento se resalta a la unidad de generación donde se realizan estudios arduos de planificación en función del pronóstico de crecimiento de la demanda para así implementar la expansión de su capacidad [14].

La planificación de expansión de generación (PEG) es un estudio que

permite determinar del diseño del sistema, la capacidad de los elementos del sistema, la estructura y además el tiempo de construcción de las nuevas fuentes de generación, por lo que constituye el centro del proceso de suministrar energía eléctrica [3]. Entonces la razón de desarrollar un estudio de planificación de expansión de generación es para responder tres interrogantes el qué, cómo, dónde y cuándo se debe incorporar nuevas centrales de generación en un determinado periodo de planificación para abastecer a la demanda pronosticada de potencia y energía de la forma más económica. Dicho estudio de proyección de la demanda permite establecer la combinación óptima de instalaciones de generación que darán abasto de energía eléctrica equilibradamente, si se comete un error simbolizaría un perjuicio social y una gran pérdida económica [4], [5].

La planificación para la expansión en generación es un desafío debido a dos razones: la primera son las incertidumbres y riesgos que surgen de las condiciones de entrada inherentes al proceso y que pueden conllevar a resultados no deseados que se describen en la

Figura 2.

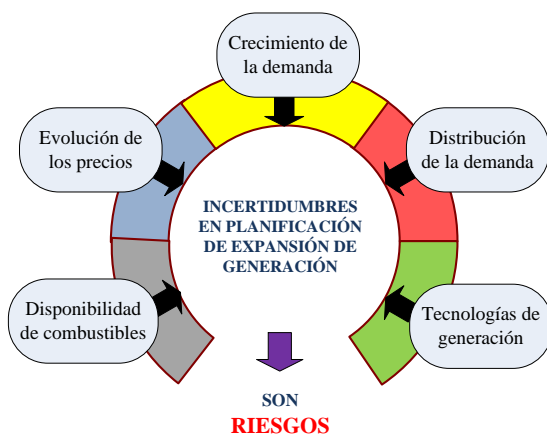


Figura 2. Incertidumbre y riesgos de la PEG.

Asumir el control de todas estas incertidumbres en la PEG por parte del planificador no es posible, por lo que se desarrollan métodos para tomar arbitrajes sobre los riesgos. De aquí surge la segunda razón por la que la PEG es un desafío, es la toma de decisiones multiobjetivo a través de métodos de optimización para minimizar o resolver los riesgos originados de las incertidumbres; por ejemplo ante la incertidumbre del crecimiento de la demanda, la operación más efectiva es avanzar con nuevas unidades de generación considerando el tipo de tecnología, su capacidad, ubicación, y segundo objetivo el precio de la energía y disponibilidad, este análisis también dependerá del periodo en el que se estudia dicho crecimiento, es por eso que el plan de expansión se debe actualizar periódicamente en función de objetivos establecidos [6]. Es decir las acciones deben ser adecuadas y satisfactorias en función del grado de riesgo dispuesto a asimilar y de los recursos financieros disponibles [15]. De lo mencionado surgen acciones dentro los estudios de planificación que se establecen en un corto, mediano, largo plazo y se describen posteriormente.

2.1.1 Planificación en un largo plazo

La planificación de expansión a largo plazo se la considera en un horizonte mayor a cinco años, es un proceso de estudio en el que se conoce un valor aproximado de la capacidad a despachar de una unidad de generación procedente de cualquier fuente renovable (hidráulica, fotovoltaica, eólica, etc.) o no renovable (térmicas) en comparación con el pronóstico de la demanda futura [16].

El objetivo a largo plazo de la planificación es salvaguardar la seguridad del sistema de potencia, minimizar costos totales de inversión que incluye a los

costos de operación y de mantenimiento. Adicionalmente el estudio a largo plazo se enfoca en establecer los costos de la energía y las ofertas de precios aproximados en base a combustibles o características propias de los generadores. Todo este proceso permite tomar una decisión en función de la evaluación los ingresos de las generadoras [17].

En base a lo mencionado los fines de la planeación de la generación a largo plazo son:

- Incrementar la capacidad instalada para abastecer en un largo plazo a la demanda pronosticada.
- Analizar todos los costos de expandir la capacidad del sistema de Tasar generación.
- el desempeño del sistema frente a la incorporación de nuevas unidades de generación.

Para la apropiada planificación se debe tener ciertas consideraciones, entre las principales se citan las siguientes: un adecuado método de predicción de la demanda, identificar y definir lineamientos en función del desarrollo de cada país, analizar la estructura de sistema eléctrico para definir puntos de generación, considerar los resultados esperados y la inversión disponible para nuevas centrales de generación [18].

2.1.2 Planificación a mediano plazo

Esta etapa de planificación considera los recursos disponibles desde las limitaciones de los generadores hasta los factores climáticos, en base a estos datos hace un análisis de riesgo y diseño para valorar el ingreso e inversión. En la elaboración considera a la planificación a largo plazo para de igual forma poder definir los precios de las ofertas y los costos de generación para que sean

considerados en el correspondiente despacho [16], [19].

Los lineamientos para la planificación de generación en un mediano plazo son:

- Una metodología para la recopilación de información.
- Determinar los parámetros para el desarrollo de la planificación de generación basados en estudios previos.
- Análisis de la proyección de la demanda desagregada por sectores y clases de consumidores para identificar el consumo actual y futuro.
- Costos de instalación de las unidades generadoras.
- Determinación de la tecnología de los generadores
- Indicadores de eficiencia de las nuevas centrales de generación para operación y mantenimiento.
- Estudio de sensibilidad.

2.1.3 Planificación de corto plazo

En función a los requerimientos de la demanda en un periodo de días define los proyectos necesarios para abastecerla es decir determina la potencia de generación horaria o semanal de cada unidad. Se caracteriza por establecer los requerimientos de la demanda de manera horaria, en función de las acciones realizadas en las planificaciones descritas anteriormente. El objetivo de esta planificación es minimizar costos en función a restricciones de operación.

Los parámetros requeridos por esta etapa de planificación son [16], [19]:

- Evaluación de confiabilidad
- Metodología de selección de proyectos considerando la inversión, beneficios y riesgos.
- Detalle del proceso y control del proyecto.

En conclusión, a lo expuesto la confiabilidad, economía, la estructura y calidad del sistema del futuro dependen de la planificación de cada una de sus etapas, mientras que estas etapas dependen la una de la otra también.

Es importante acotar que de forma global la planificación usa métodos de optimización matemáticos basados en el cálculo teórico y algoritmos heurísticos igualmente de optimización pero basados en la experiencia e intuición [20], [21].

2.1.4 Planificación de expansión de generación: Situación en el Ecuador.

En el Ecuador según [22], el Reglamento General de la Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica, establece que la expansión del sector eléctrico es elaborado por el Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables en colaboración con las empresas eléctricas involucradas, quienes establecen las acciones y planes de generación que deben realizarse para garantizar el abastecimiento a la demanda en el plazo corto, medio y largo. Los nuevos proyectos de generación requeridos son incorporados en función a bloques de potencia y energía, a la tecnología de generación y según plazos pronosticados en el Plan Maestro de Electricidad (PME).

El Plan Maestro de Electricidad es elaborado por el MERNNR, aquí es donde se identifica a los proyectos prioritarios de generación e igualmente los planes de expansión y mejora, que están proyectados para diez años [23]. El PME orienta la realización de proyectos que promuevan el desarrollo del país al abastecer del servicio público de electricidad a la demanda; en el apartado [24] se estudia lo referente a la planificación de expansión de generación (PEG), donde se define como una

herramienta que está adaptada a la dinámica del sistema eléctrico ecuatoriano conforme a la potencia y energía del Sistema Nacional Interconectado y a las políticas y lineamientos sectoriales y nacionales, estas políticas son:

- La PEG debe considerar los cronogramas de ejecución de proyectos de mediano y largo plazo.
- En base a los recursos hidrológicos la PEG debe cumplir con ciertos niveles de potencia y energía de reserva.
- Se debe considerar la oferta y la demanda de energía del sistema petrolero
- Se debe considerar los precios internacionales de combustible en la expansión optima.
- Las conexiones internacionales son consideradas como una optimización en los costos de operación, pero son base en el abastecimiento.
- Se debe integrar la matriz energética por medio de bloques de energía y potencia que son cubierto por proyectos de generación existentes, propuestos públicos y propuestos privados.

En el Ecuador las estrategias para la expansión de generación son las que se presentan en la Figura 3.

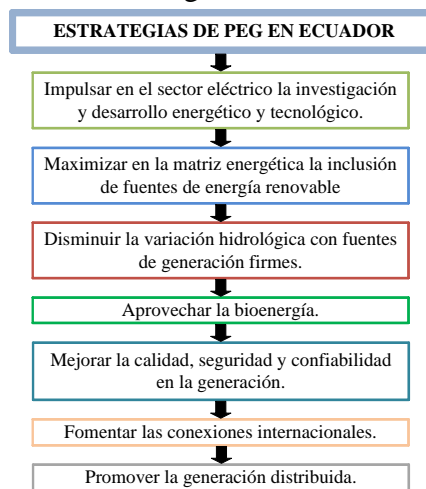


Figura 3. Estrategias de PEG en Ecuador [24]

Los lineamientos para la planificación de expansión de generación que se incorporan para el análisis son:

- a) Crecimiento de la demanda: el Plan de Expansión de Generación en Ecuador considera un caso base tendencial de pronóstico de la demanda, también la eficiencia de la energía agrega las cargas de las empresas distribuidoras y las del sistema petrolero para optimizar el uso de la energía integralmente.
- b) Interconexiones internacionales: la planificación considera la exportación de energía más no toma en cuenta la venta de excedentes de energía a otros países con el objetivo de garantizar el suministro de electricidad de todo el Ecuador, pero en la actualidad la conexión con Perú y Colombia constituyen una fuente de potencia y energía agregada y presente en caso de contingencias, esta interconexión podría representar una disminución de costos operación.
- c) Infraestructura existente: según los datos tomados del Plan de Expansión de Generación en el Plan Maestro de Electricidad [24] en el 2018 el Ecuador tiene un parque generador de 317 unidades que representan 8183 MW de potencia efectiva, aquí están integradas los generadores de Sistema Nacional Interconectado y el Sistema No Incorporado (Galápagos, sistemas eléctricos de acceso limitado e interconexiones regionales).

Para el proceso de PEG del Ecuador se utilizan dos instrumentos computacionales, el primero es un programa llamado OPTGEN que basado en la predicción de la demanda y en las unidades de generación disponibles realiza la minimización de costos de

inversión, operación y mantenimiento; y se integra con el segundo programa SDDP que realiza un despacho estocástico hidrotérmico considerando las incertidumbres de la

Figura 2, realiza un análisis probabilístico para hallar el mínimo costo de inversión en base a distintos escenarios que simulan despachos económicos para la demanda pronosticada futura.

Finalmente se concluye que el PEG tiene como objetivo minimizar los costos totales con los que el sistema opera y se expande considerando restricciones económicas, técnicas, ambientales, de calidad y la gestión de riesgos [22].

2.2 Mercado eléctrico: situación del Ecuador

La estructura del mercado eléctrico se ha ido modificando constantemente en busca de modelos liberalizados donde los precios uniformes de la energía sean competitivos y de licitación en el mercado, es así que en varios países se esfuerzan por realizar mecanismos de subasta que equilibren la oferta con la demanda [25].

Estos sistemas de mercado reflejan los costos de generación reales que se producen de la evolución del parque generador [26], en el presente trabajo se dirigirá la atención a procesos metodológicos en Ecuador, similar a los en los países de la región, donde se ha estructurado un mercado eléctrico e incorporado esquemas de licitación o subastas cuyo modelo se observa en la Figura 4, el esquema tiene el propósito de asegurar el suministro de energía a la demanda y de promover en precios un mercado competitivo de compra y venta de electricidad [7], [27]. En base a la Figura 4 el mercado eléctrico tiene tres tipos de contratación [7]:

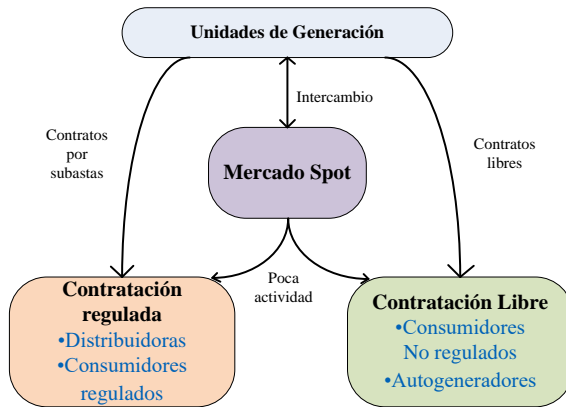


Figura 4. Modelo del mercado eléctrico del Ecuador [7].

- a) **Contratación regulada:** permite a las empresas distribuidoras contratar el porcentaje total para cubrir la demanda de usuarios regulados, la licitación puede ser de la energía existente, de la nueva y de la generación distribuida.
- b) **Contratación Libre:** permite contratos con grandes generadores y consumidores.
- c) **Mercado Spot:** este mercado es sesgado y se utiliza para la compra de energía que cubra necesidades puntuales. En este caso para contratar nueva generación se implementa subastas públicas para la inversión en generación del sector privado, este proceso permite establecer un precio óptimo de energía que mejora la economía del sector desde los usuarios finales, la distribuidora hasta la unidad de generación durante el periodo del contrato [28].

Es importante resaltar que un modelo de licitación de cualquier contrato debe caracterizarse por crear un mecanismo claro, minimizar las incertidumbres y por ende los riesgos en el aumento de la demanda, precios y disponibilidad de la energía, así como de combustibles, etc., y finalmente debe valorar correctamente a la energía eléctrica.

Los contratos firmados en una subasta deben ser el resultado de poseer firmeza en el respaldo de producción firme, lo cual garantiza la seguridad del abastecimiento, si no se cumple se aplican fuertes represalias a las generadoras.

2.2.1 Subastas de energía eléctrica

Es un proceso en el que un número de participantes pretende que se le otorgue un bien en base a una oferta en busca maximización de sus beneficios. El diseño óptimo de subasta realiza la comparación de precios y eficiencias de las propuestas recibidas y los resultados permiten alcanzar precios equilibrados de energía en un determinado plazo del contrato [29].

La clasificación de las subastas se realiza en función de la cantidad de bienes a licitar (uniproducto y multiproducto), según la valoración del bien (común o privado) y en base a las reglas del proceso de la subasta (ascendente y descendente), en base a [30].

Básicamente son dos mecanismos de subasta: holandesa e inglesa, de los que se derivan los formatos de: sobre abierto o cerrado y subasta de uno o varios bienes [31], [32], aspectos que se presentan en la Tabla 1 y se describe cada una de ellas.

Tabla 1. Tipos de subastas.

Subasta para un producto		Subasta para varios productos	
ABIERTO	SOBRE CERRADO	ABIERTO	SOBRE CERRADO
Subasta Inglesa	Segundo precio	Subasta Inglesa	Precio uniforme
Subasta Holandesa	Primer precio	Subasta Holandesa	Pay as Bid

- **Subasta inglesa para un bien:** es una subasta común que sube el precio desde un mínimo y se le adjudica el contrato a quien acepte el precio último siendo el caso de la oferta,

pero si el caso es la demanda el precio disminuye iterativamente desde el valor máximo y gana quien acepte el mínimo precio.

- Subasta holandesa multiproducto: el precio inicial va disminuyendo hasta que el interesado decide aceptar refiriéndose a la oferta, mientras que para la demanda el proceso es contrario va desde un mínimo y aumenta hasta que alguien acepta el precio.
- Subasta de primer precio para un bien: en este mecanismo los compradores al mismo tiempo únicamente pueden realizar una oferta sin conocimiento de las demás, la oferta debe estar en un sobre cerrado y se otorga el contrato o bien al precio más caro cuando es el lado de la oferta y si el lado es la demanda se le otorga al precio más bajo.
- Subasta de segundo precio para un solo bien: los compradores hacen una sola oferta al mismo tiempo que los demás igualmente que la anterior en un sobre cerrado, el precio o bien se adjudica a la oferta más cara y el precio es de la segunda oferta esto cuando se refiere a la oferta y cuando se trata de la demanda la oferta elegida es la más barata y el precio corresponde a la segunda oferta más baja.

Para cuando los bienes o contratos adjudicados son varios el concepto es el mismo, pero se manejan procesos combinatorios, llamadas subastas combinatorias y en base a estos procesos se desarrolla el presente modelo de optimización. A continuación, se describe el proceso refiriéndose únicamente a lado de la demanda quien solicita el bien o servicio [1], [33].

- Subasta inglesa para varios productos: este mecanismo quiere licitar varios productos homogéneos, mediante un proceso iterativo se presenta un precio alto, lo que produce una sobreoferta y los precios empiezan a disminuir hasta alcanzar un precio de equilibrio con la demanda, de forma que todos los bienes se comercian a un mismo precio de equilibrio [31], el proceso se visualiza en la Figura 5.

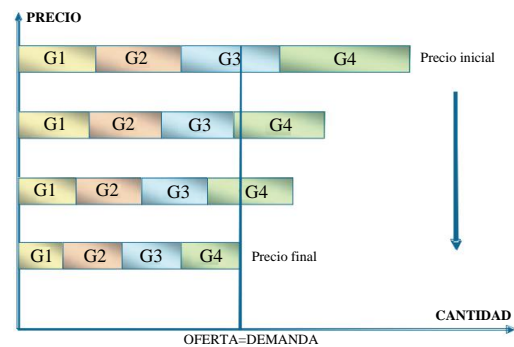


Figura 5. Mecanismo de subasta inglesa multiproducto [7].

- Subasta holandesa para varios productos: el proceso es el mismo que la subasta inglesa excepción de que el precio inicial es el más bajo e itera hasta que los vendedores iniciales negocian su precio y el bien es liquidado, así ocurre con el resto de los bienes [34]. En la Figura 6 se observa el proceso.

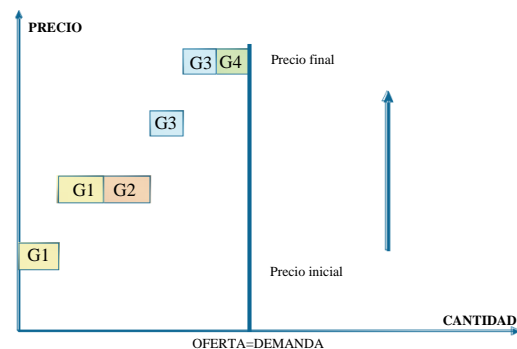


Figura 6. Subasta holandesa de varios bienes [7].

- Subasta Pay-As-Bid para varios productos: en este proceso los oferentes escriben la cantidad de la oferta y el precio su propuesto en un papel en un sobre cerrado, se ordenan de menor a mayor las ofertas y se adjudica a las más económicas [33], lo descrito se visualiza en la Figura 7.

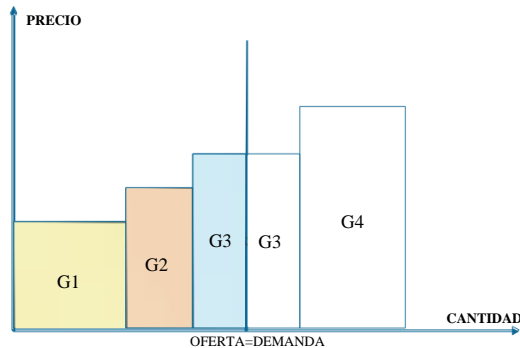


Figura 7. Subasta Pay-As-Bid [7].

- Subasta de precio uniforme para varios productos: De lo mostrado en la Figura 8, esta subasta se presenta igual a la anterior, se ordena las ofertas de menor a mayor y se elige las más económicas, con la diferencia de que el precio que se paga es el mismo para todos, se toma como referencia el precio de negociación más alto o marginal [31].

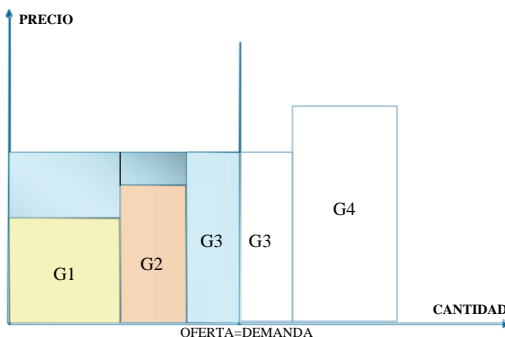


Figura 8. Subasta de precio uniforme para varios bienes [7].

2.2.2 Subastas de electricidad: situación en el Ecuador

El proceso de subastas de electricidad en el Ecuador está contemplado dentro de la LOSPEE y el RGLOSPEE (Reglamento) donde se establece que el Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables podrá determinar los casos en que sea necesaria la contratación de nueva generación, para estos casos se recurre a un proceso de licitación pública para la participación empresarial donde se autoriza a través de títulos habilitantes la colaboración de empresas públicas y mixtas así como a las empresas privadas y empresas de economía popular y solidaria [22].

Los títulos habilitantes permiten la participación de las empresas en las actividades de generación, transporte, distribución, comercio, interconexiones, alumbrado público del país, y en todas las etapas que generen dichos proyectos desde estudios, diseño, edificación, operación, administración y mantenimiento. Estos títulos se rigen a normativas donde dan derechos y facilidades a las empresas para que desarrollen su actividad, pero también las obligaciones sumamente estrictas que deben cumplir.

El Estado por medio del Ministerio y de los títulos habilitantes emitidos faculta a:

- Las empresas públicas a realizar todas las acciones y contratos dentro de todas las áreas del sector eléctrico.
- Las empresas mixtas pueden acceder a la realización de actividades dentro del sector siempre y cuando la mayoría accionaria sea del Estado y que las actividades a desarrollarse no puedan ser realizadas por empresas públicas.
- Las empresas estatales internacionales están habilitadas

también para realizar actividades en el sector.

- Las empresas de capital privado excepcionalmente pueden participar en actividades del sector eléctrico cuando sea necesario cubrir la demanda que no pueda ser atendida por las empresas públicas o mixtas y cuando los proyectos provengan de energías renovables no convencionales y no estén en el Plan Maestro de Electricidad. Así mismo sucede con las empresas de economía popular y solidaria.

Una vez definidos los títulos habilitantes a las empresas, el Ministerio inicia un Proceso Público de Selección – PPS en base a la planificación de expansión [23]. Este proceso es ejecutado por el Ministerio que llevará a cabo una selección legal, justa, igual, de calidad, transparente y de celeridad, entre empresas privadas y de economía popular y solidaria para que realicen actividades dentro del sector eléctrico.

Los procesos públicos de selección en el área de generación son para cubrir la demanda regulada y la de grandes consumidores que se requiera, por medio de proyectos o bloques de generación en base a las normativas del Ministerio. Adicionalmente concede actividades de operación, mantenimiento y administración.

Los proyectos de generación que se consideren en el proceso deben contar con estudios de prefactibilidad para la preparación de las ofertas de los participantes; y para los bloques de generación el Ministerio debe tener establecidos los valores de energía y potencia, capacidades, la tecnología, ubicación y demás características técnicas, ambientales y financieras.

El procedimiento lo convoca el Ministerio, las empresas deben precalificar para verificar su capacidad y

finalmente la adjudicación se basa en la selección de las mejores condiciones, en el interés nacional, y en la evaluación de los pliegos y términos de referencia.

En base a al marco teórico desarrollado se realiza un modelo matemático que ejemplifica las subastas de energía combinatorias, cuyo concepto puede adaptarse a los procesos públicos de selección, considerando la expansión de la generación en el sistema eléctrico de potencia del Ecuador y su crecimiento de demanda, a través de este modelo se determina los proyectos de generación que se usaran para el abastecimiento de la demanda en el mediano largo plazo.

3 Modelo matemático

El modelo matemático de optimización permite realizar la subasta de energía mediante un proceso combinatorio, el cual se basa primordialmente en la programación lineal, sin embargo, se introduce la interacción de una variable binaria de decisión, la cual determina el o los paquetes que abastecerán la demanda, la resolución del modelo matemático será realizada mediante el software GAMS

Este modelo permite definir dentro del bloque de energía específico, condicionamientos de tipo geográfico, temporal y eléctrico para precisar los productos a ser subastados, lo que permite cumplir con las condiciones de transparencia y competitividad requeridos para estos procesos y puede ser ampliado para tomar en cuenta condiciones adicionales.

3.1 Consideraciones generales

Las subastas o los Procesos Públicos de Selección - PPS, según se lo ha denominado en Ecuador, tienen por finalidad lo siguiente:

- Abastecer la demanda eléctrica nacional a través de la incorporación de nueva generación.
- Establecer el valor real de la energía y potencia eléctrica entregada por cada generador adjudicado en los PPS, mismo que será cubierto por la demanda.
- Pronosticar de manera acertada la energía e ingresos que podrán percibir los generadores de los proyectos adjudicados en los PPS.

Para el presente estudio se considera que la planificación de la expansión de generación, usada a través del Plan Maestro de Electricidad- PME determina los proyectos específicos y bloques de energía que deberán ser desarrollados por las empresas de generación para cubrir la demanda.

Bajo este contexto, el estudio considera que las ofertas de los bloques de energía no superen el precio máximo para proyectos específicos determinados por el Estado, lo cual permite efectuar una competencia de los ofertantes mediante una subasta inversa. Los bloques energéticos serán particionados considerando los siguientes aspectos:

- Abastecimiento de la demanda en cada uno de los periodos hidrológicos
- Ubicación en las diferentes regiones geográficas; y,
- Desarrollo de acuerdo con el potencial de existencia de recursos energéticos

La combinación de los aspectos citados da lugar a múltiples productos que deben ser subastados, por tanto, la determinación de los proyectos a ser adjudicados puede ser realizada por medio de una subasta combinatoria. En este sentido, el modelo de optimización considera las restricciones lineales

impuestas y se adiciona variables del tipo binarios que determinan los productos y el proyecto de generación para el abastecimiento de la demanda en condiciones económicas factibles para la demanda. Por lo expuesto se señala que, las ofertas en esta clase de subastas se presentan como paquetes que cada postor estableciendo las preferencias de los productos que quiere ofertar.

3.2 Formulación matemática

El modelo de optimización considera una subasta combinatoria, el cual está constituido por una función objetivo y las restricciones, cuyo detalle se muestra en los siguientes numerales.

3.2.1 Función objetivo

En este modelo la función objetivo corresponde a la maximización del excedente económico total, el cual en términos generales determina los proyectos de generación de mínimo costo que podrán ser incorporados para abastecer la demanda. En tal sentido, la función objetivo corresponde a la diferencia entre la suma total de los precios máximos de los paquetes asignados menos la suma total de la oferta económica de los oferentes asignados, cuya formulación matemática es la siguiente:

$$Exc = \max \sum_{j,k \in a(j,k)} p_k x_{jk} - \sum_{j,k \in a(j,k)} c_k x_{jk} \quad (1)$$

Donde:

- j Cantidad de oferentes
- k Paquetes ofertados
- $a(j, k)$ Paquetes que corresponden a cada oferente
- c_k Oferta económica del paquete k
- p_k Precio máximo del paquete k

x_{jk} Variable binaria igual a 1 si el paquete k es asignado al oferente j

3.2.2 Restricción para asignación de producto

Esta restricción permite que cada producto sea asignado solamente a un paquete ofertado, dado que el monto de las ofertas es establecido por el oferente; por lo tanto, se puede deducir que esta restricción establece que la energía vendida sea igual o menor a la cantidad demandada para cada uno de los productos, lo cual garantiza que no exista un sobre equipamiento de generación que puede causar impacto económico negativo a la demanda, la formulación matemática es la siguiente:

$$\sum_{j,k \in a(j,k)} o_{ik} x_{jk} \leq 1 \quad \forall i \quad (2)$$

Donde:

j Cantidad de oferentes
 k Paquetes ofertados
 $a(j, k)$ Paquetes que corresponden a cada oferente
 o_{ik} Matriz compuesta de 0 y 1 donde o_{ik} es igual a 1 si el producto i esta en el paquete k .
 x_{jk} Variable binaria igual a 1 si el paquete k es asignado al oferente j

3.2.3 Restricción para asignación de paquetes

Esta restricción establece que ningún oferente reciba más de un paquete, de esta manera la cantidad vendida de energía no será mayor que la oferta entregada en la subasta que está determinada en cada uno de los paquetes, lo cual garantiza que el oferente entregue la energía acordada y no incumpla sus compromisos. Es

importante indicar que cada oferente puede proponer varios paquetes en su oferta, pero será asignado, de ser el caso, solamente a uno de ellos, la formulación matemática es la siguiente:

$$\sum_{j,k \in a(j,k)} x_{jk} \leq 1 \quad \forall j \quad (3)$$

Donde:

j Cantidad de oferentes
 k Paquetes ofertados
 $a(j, k)$ Paquetes que corresponden a cada oferente
 x_{jk} Variable binaria igual a 1 si el paquete k es asignado al oferente j

Por lo expuesto, el modelo de optimización corresponde a un problema de programación lineal mixto, cuyo proceso de implementación se muestra en el siguiente numeral.

4 Implementación del Modelo Matemático

A fin de validar el modelo de optimización, se usa los datos de demanda y los proyectos de generación del PME 2019 – 2027, los cuales interactuarán a fin de poder aplicar el modelo propuesto.

4.1 Parámetros del modelo

Para plantear el modelo se emplea los datos que se encuentran en el PME 2019 – 2027, del cual se usa el valor de la demanda y los proyectos de generación a ser implementados para un año determinado, datos que permitirán establecer la oferta y demanda a ser considerada para el proceso de la subasta.

Para el caso de la demanda y según lo establecido en el PME 2019-2027, se tomará en cuenta el crecimiento del sector residencial, comercial e industrial, cuyos

porcentajes corresponden a un promedio de 2,45%, 3,27% y 3,03%, respectivamente. Por su parte, los proyectos de generación a ser subastados corresponderán a los que serán estructurados para Procesos Públicos de Selección. Con esta información se estructurará la matriz de correspondencia para determinar los paquetes que se podrán ofertar.

Considerando la función objetivo y las restricciones asociadas, se determina que el problema de optimización corresponde a una Programación Lineal Mixta que por sus siglas en ingles se lo conoce como MLP, dicho modelo será resuelto mediante el optimizador GAMS (General Algebraic Modeling System).

4.2 Procedimiento de resolución

El problema de optimización será resuelto mediante el software GAMS, el cual, a través de un proceso de adquisición de datos de la demanda y las características de los proyectos de generación, resolverá el problema lineal mixto, determinando los ofertantes y los paquetes que serán destinados al abastecimiento de la demanda, para el efecto se usará la demanda energética a ser abastecida al año 2027 y los proyectos de generación a ser promocionados por PPS. En la Tabla 2 se indica el algoritmo para la resolución del modelo de optimización planteado.

Tabla 2. Algoritmo del Modelo de optimización.

Algoritmo_SubComb	
Paso 1:	Determinación de cantidad de oferentes. J= [Oferente1, Oferente2, Oferente n]
Paso 2:	Determinación de Demanda I= [Dem1, Dem2, ..., Dem-n] Determinación de paquetes energéticos
Paso 3:	K= [Paq1, Paq2, ..., Paq3]
Paso 4:	Set valores de los proyectos de generación y demanda.
Paso 5:	Set Precios máximos.

Paso 6: Problema de Optimización en GAMS

Set Condiciones iniciales

Set variable binaria

$$X_{jk} \in \{0,1\}$$

Set Restricciones de desigualdad

$$\sum_{j,k \in a(j,k)} o_{ik} x_{jk} \leq 1 \quad \forall i$$

$$\sum_{j,k \in a(j,k)} o_{ik} x_{jk} \leq 1 \quad \forall i$$

Función Objetivo

$$Exc = \max \sum_{j,k \in a(j,k)} p_k x_{jk} - \sum_{j,k \in a(j,k)} c_k x_{jk}$$

Paso 7 Análisis de resultados

Paso 8 Fin

4.3 Caso de estudio

La resolución del problema de optimización comenzará en la importación de datos de: i) la demanda; ii) los costos asociados; y, iii) parámetros del parque de generación, posteriormente se resuelve el modelo de optimización. La demanda considerará un crecimiento promedio de 5,44 % anual, del PME 2019 -2027, del cual se desprende la Figura 9:

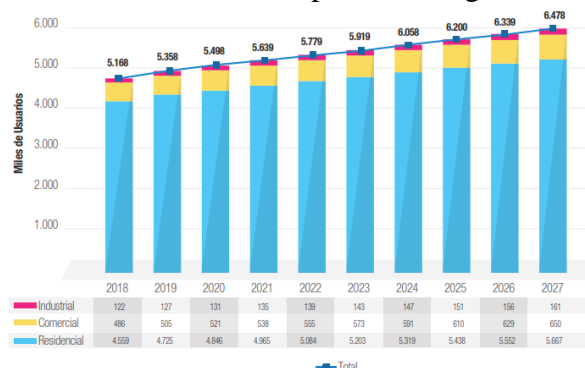


Figura 9. Proyección de usuarios por grupo de consumo [35].

Los resultados de la proyección de la demanda de energía total y su desagregación por grupo de consumo para el periodo de análisis alcanzan los 33.840 GWh en el 2027, el detalle por año se muestra en la Figura 10.

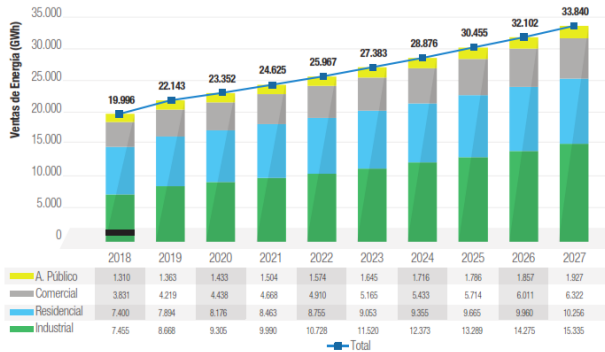


Figura 10. Proyección de la demanda de energía por grupo de consumo [35].

El porcentaje de participación a nivel energético por cada una de las empresas de distribución del país, según lo establecido por el PME citado [35], muestra que el porcentaje de CNEL EP es el más alto y la diferencia se reparte entre las empresas de distribución restantes, la participación se muestra en la Figura 11.

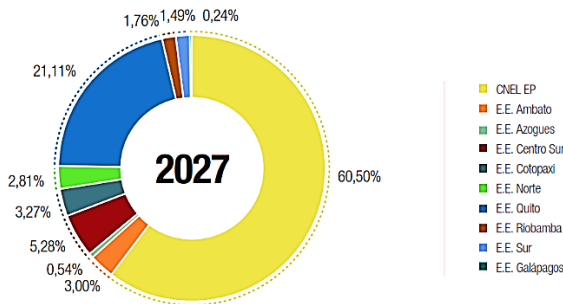


Figura 11. Participación de distribuidoras en la proyección de energía [35]

De lo expuesto en los datos de la demanda se entiende que al 2020 la demanda energética abastecida es de 23 352 GWh, teniendo una diferencia de 10 488 GWh, la cual, en función a los porcentajes de participación, se desprende la Tabla 3.

Tabla 3. Energía asignada por empresa de distribución.

Demanda	EED	% Participación	Energía (GWh)
i1	CNEL EP	60.5	6,345.2
i2	EE AMBATO	3	314.64
i3	EE AZOGUEZ	0.54	56.64

i4	EE Centro SUR	5.28	553.77
i5	EE COTOPAXI	3.27	342.96
i6	EE NORTE	2.81	294.71
i7	EE QUITO	21.11	2,214.0
i8	EE RIOBAMBA	1.76	184.59
i9	EE SUR	1.73	181.44

Los proyectos de generación a ser determinados como ofertantes se obtienen del PME 2019-2027, de cual se extraen los siguientes datos:

Tabla 4. Proyectos de generación.

Proyecto / Oferente	Tipo	Potencia (MW)	Energía Media (GWh/año)
• Bloque de ERNC I. Incluye Fotovoltaico Aromo y Eólico – J1	ER	500	1700
• Bloque de Ciclo Combinado I – J2	T	400	3000
• Bloque de ERNC II – J3	ER	400	1400
• Bloque de Ciclo Combinado II – J4	T	600	4500
• Bloque de Proyectos Hidro – J5	H	150	850
• Bloque de proyectos geotérmicos I – J6	GT	50	380
• Paute – Cardenillo – J7	H	595.6	3409
• Santiago (G8), Fase I – J8	H	1200	6832.8
• Santiago (G8), Fase II – J9	H	1200	6832.8

H: Hidráulicos
T: Térmicos
GT: Geotérmicos
ER: Energía renovable

A fin de determinar los precios máximos que estaría dispuesto el Estado a costear por el ingreso de los nuevos proyectos de generación se usará [36],



Figura 12. LCOE globales de las nuevas tecnologías de generación de energía renovable 2010 -2019 [36]

documento a través del cual la Agencia Internacional de Energías Renovables, en inglés International Renewable Energy Agency – IRENA, analiza el Costo normalizado de electricidad – CONE o Levelised Cost of Electricity - LCOE de las energías renovables durante la última década de las tecnologías.

El LCOE o CONE es una medida del costo presente neto promedio de la generación de electricidad para una planta generadora durante su vida útil. El LCOE se calcula como la relación entre los costos descontados durante la vida útil de una central de generación dividida por la suma de las cantidades de energía reales entregadas. Por lo tanto, el LCOE puede representar el ingreso promedio por unidad de energía eléctrica generada que se requeriría para recuperar los costos de construcción y operación de una planta generadora durante un ciclo de vida financiera.

Tabla 5. Precios Máximos para proyectos de generación.

Proyecto - Oferentes	Tipo	Precio Máximo (USD/kWh)
• Bloque de ERNC I – J1	ER	0.077
• Bloque de Ciclo Combinado I – J2	T	0.105
• Bloque de ERNC II – J3	ER	0.074
• Bloque de Ciclo Combinado II – J4	T	0.12
• Bloque de Proyectos Hidro – J5	H	0.06
• Bloque de proyectos geotérmicos I – J6	GT	0.073
• Paute – Cardenillo – J7	H	0.065
• Santiago (G8), Fase I – J8	H	0.063
• Santiago (G8), Fase II – J9	H	0.059

Por lo expuesto el LCOE evaluado por diferentes tecnologías durante el año 2010 al año 2020, se presenta en la Figura 12, de la cual se obtienen los precios

máximos y corresponden a los que se muestran en la Tabla 5.

A fin de poder simular una subasta combinatoria, se requerirá que los ofertantes realicen sus ofertas en combinaciones de elementos discretos denominados “paquetes”, en lugar de elementos individuales o cantidades continuas, en tal sentido en la Tabla 6 se aprecia los “Paquetes” por cada ofertante o proyecto de generación, para el caso de estudio se ha planteado treinta (30) “Paquetes (k1, k2... k30)”.

Tabla 6. Paquetes por ofertante.

	DEMANDA									
	i1	i2	i3	i4	i5	i6	i7	i8	i9	
k1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	J1
k2	0	0	1	1	1	1	0	1	1	
k3	0	1	1	1	1	1	1	1	1	
k4	0	0	0	0	1	0	1	1	1	J2
k5	0	0	1	1	0	0	1	0	0	
k6	0	0	0	0	1	1	1	0	0	
k7	0	0	0	1	0	0	1	1	0	J3
k8	0	1	1	0	0	1	1	0	0	
k9	0	1	1	0	1	0	1	0	0	
k10	0	1	1	0	1	1	0	1	1	J4
k11	0	1	1	1	0	0	0	1	1	
k12	0	0	0	1	1	1	0	1	0	
k13	0	1	0	1	1	0	0	0	1	J5
k14	0	1	1	1	1	1	1	1	1	
k15	0	0	0	0	1	1	0	1	0	
k16	0	1	1	0	1	0	0	0	0	J6
k17	0	1	1	0	0	0	0	1	1	
k18	0	0	0	1	0	1	0	0	0	
k19	0	0	0	0	0	0	0	1	1	J7
k20	0	1	1	0	0	0	0	0	0	
k21	0	0	1	0	0	1	0	0	0	
k22	0	0	0	0	1	0	0	0	0	J8
k23	0	0	0	1	1	1	1	0	0	
k24	0	1	1	0	0	1	1	1	1	
k25	0	0	0	1	1	0	1	1	0	J9
k26	0	1	1	1	0	0	1	0	1	
k27	1	1	1	0	0	0	0	0	0	
k28	1	0	1	0	0	0	0	1	1	

k29	1	0	0	0	0	1	0	1	0	J9
k30	1	0	0	0	0	0	0	0	0	

A fin de poder establecer los precios del ofertante y poder generar la subasta combinatoria, se utilizará la información de la Figura 12, de la cual se obtiene la Tabla 7, en la que se establece el precio propuesto por el ofertante, adicional se incluye la energía a ser colocada por cada oferta.

Tabla 7. Precio y Energía por paquete.

	Precio Ofertado (USD/kWh)	Energía Media (GWh)	
J1	k1	0.064	1700
	k2	0.071	1700
	k3	0.068	1700
J2	k4	0.077	3000
	k5	0.093	3000
	k6	0.077	3000
	k7	0.084	3000
	k8	0.08	3000
	k9	0.079	3000
J3	k10	0.055	1400
	k11	0.057	1400
	k12	0.065	1400
J4	k13	0.073	1400
	k14	0.096	4500
	k15	0.053	850
J5	k16	0.057	850
	k17	0.059	850
	k18	0.05	850
J6	k19	0.064	380
	k20	0.062	380
	k21	0.063	380
J7	k22	0.06	380
	k23	0.055	3409
	k24	0.057	3409
J8	k25	0.059	3409
	k26	0.0585	3409
	k27	0.061	6832.8
J9	k28	0.059	6832.8
	k29	0.0567	6832.8
	k30	0.057	6832.8

5 Análisis de resultados

Una vez usados los datos descritos en el numeral anterior y resolviendo el modelo de optimización propuesto se obtiene los oferentes y el paquete asociado que permitirá el abastecimiento de la demanda, dichos resultados se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Asignación de Oferentes y Paquetes.

		Paquetes			
		k4	k18	k20	k30
Demanda	i1	0	0	0	1
	i2	0	0	1	0
	i3	0	0	1	0
	i4	0	1	0	0
	i5	1	0	0	0
	i6	0	1	0	0
	i7	1	0	0	0
	i8	1	0	0	0
	i9	1	0	0	0
		J2	J5	J6	J9
		Ofertantes			

Considerando los resultados de la tabla anterior y en función a la codificación realizada en el presente trabajo se indica lo siguiente:

- 1) El oferente J2 que corresponde al Bloque de Ciclo Combinado I de 400 MW abastecería a las demandas energéticas i5, i7, i8, i9 las cuales corresponden a las demandas de las EE COTOPAXI, EE QUITO, EE RIOBAMBA y EE SUR.
- 2) El Bloque de Proyectos Hidroeléctricos de 150 MW, correspondiente al oferente J5, abastecerá la demanda de EE Centro Sur y EE NORTE, correspondientes a las demandas i4 e i6.
- 3) Por su parte, la demanda energética de EE AMBATO y EE AZOGUEZ correspondiente a i2 e i3, será

abastecida por el Bloque de proyectos geotérmicos I de una capacidad de 50 MW que es asignado al oferente J6.

- 4) Así mismo, el proyecto Santiago (G8), correspondiente al oferente J9, abastecerá la demanda energética de CNEL EP el cual corresponde a la demanda i1.
- 5) Finalmente, y de lo descrito en la tabla, a pesar de que existan varios paquetes propuestos, el optimizador escoge un paquete de un oferente y adicional, determina que los paquetes escogidos no repitan el abastecimiento a una misma demanda, de lo cual se deduce que el modelo planteado efectivamente realiza una subasta combinatoria.

Con la selección de los paquetes y los proyectos de generación, a continuación, se efectuará un análisis energético para validar el abastecimiento de la demanda, tomado en cuenta la demanda y la energía a ser entregada por los proyectos de generación.

Tabla 9. Asignación energética para la demanda.

	Asignación energética (GWh)			
	k4	k18	k20	k30
CNEL EP				6,345.24
EE Ambato			314.64	
EE Azoguez			56.64	
EE Centro Sur		553.77		
EE Cotopaxi	342.96			
EE Norte		294.71		
EE Quito	2,214.02			
EE Riobamba	184.59			
EE Sur	181.44			
TOTAL	2,923.01	848.48	371.28	6,345.24

Así mismo, la producción de energía de los proyectos de generación elegidos

corresponde a los que se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Producción energética de los proyectos de generación asignados.

Proyecto de generación	Producción de Energía (GWh)			
	J2	J5	J6	J9
	Bloque de CC I	Bloque de Proy. Hidro	Bloque de Proy. Geotérm I	Santiago (G8), Fase II
TOTAL	3,000.00	850.00	380.00	6,832.80

Como resultados de la producción energética y la demanda abastecida, se determina un excedente de 574.8 GWh, el cual corresponde a un error del 5.48 % respecto a la demanda a ser abastecida, lo cual obedece a las posibles incertidumbres, que se muestran en la

Figura 2, que pueden ocurrir por los proyectos de generación, sin embargo, el error es aceptable dado que a nivel energético se estima un error de máximo el 10%.

Complementario a lo descrito y considerando lo establecido en la Tabla 9 y Tabla 10, la Figura 13 muestra los proyectos de generación en función de los paquetes seleccionados como resultado de la subasta cuya energía será destinada para el abastecimiento de las demandas asociadas.

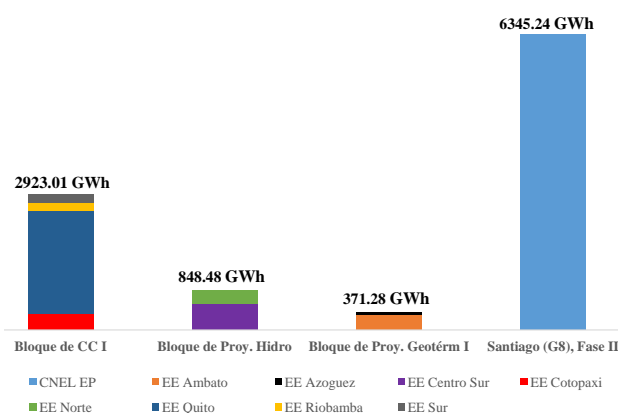


Figura 13. Energía a ser abastecida a la demanda por parte de los proyectos de generación seleccionados de la subasta.

Para realizar el análisis económico se procede a determinar el valor económico que el Estado está dispuesto a pagar por la energía de los proyectos de generación obtenidos determinados por el modelo de optimización, cuyos montos energéticos serán valorados al precio máximo establecido en la Tabla 11 obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla 11. Valor máximo a pagar por energía producida.

Proyecto de generación	Producción de Energía (GWh)			
	J2	J5	J6	J9
	Bloque de CC I	Bloque de Proy. Hidro	Bloque de Proy. Geotérm I	Santiago (G8), Fase II
Total	3,000.00	850.00	380.00	6,832.80
Precio Máximo USD/kWh	0.105	0.06	0.073	0.058
Valor (MMUSD)	3150	510	277.4	3963.02

De los resultados anteriores se obtiene que el Estado está dispuesto a cubrir un monto de 7900,42 millones de dólares. Ahora se procederá a determinar el valor obtenido por el modelo con la optimización propuesto.

Tabla 12. Valor a pagar por energía producida – Modelo de subasta.

Proyecto de generación	Producción de Energía (GWh)			
	J2	J5	J6	J9
	Bloque de CC I	Bloque de Proy. Hidro	Bloque de Proy. Geotérm I	Santiago (G8), Fase II
Total	3,000.0	850.00	380.00	6,832.80
Precio Máximo USD/kWh	0.077	0.05	0.062	0.057
Valor (MMUSD)	2310	425	235,6	3894,7

La Tabla 12 muestra que, resultado del modelo de subasta, la demanda pagará un valor de 6865,3 millones de dólares por la

energía entregada de los proyectos de generación seleccionados, por lo que se obtiene un ahorro para el Estado de 1035,12 millones de dólares, lo cual se comprueba la validez del modelo de optimización propuesto garantiza que la selección de los proyectos generación minimizan el costo a ser cubierto por el Estado, lo citado se muestra en la Figura 14

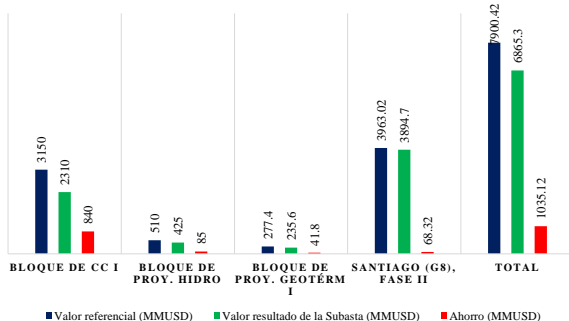


Figura 14. Valoración económica resultado de la subasta combinatoria.

6 Conclusiones

Del análisis realizado, se presenta los siguientes aspectos concluyentes:

- El presente trabajo desarrolla un modelo de optimización que permite determinar los proyectos de generación y la energía a ser entregada al sistema para el abastecimiento de la demanda a través de subastas inversas de energía considerando un proceso combinatorio de paquetes que son representado a través de ofertas.
- Del marco teórico realizado, las subastas de energía corresponden a un mecanismo comercial innovador que conlleva a generar competencia entre los oferentes, de la teoría económica se deduce que la subasta inversa es la más usada en los procesos para la asignación de los proyectos de generación de energía eléctrica, dicha subasta puede tener variantes, siendo

una de ellas la implementación de combinaciones de ofertas, aspecto que se aborda en el presente trabajo y de los resultados económicos analizados se muestra un ahorro de 1035,12 millones de dólares para el Estado.

- El modelo de optimización tiene como objetivo maximizar los excedentes resultado de la diferencia del precio máximo que está dispuesto el Estado a cubrir y el precio ofertado por el oferente, lo cual permite que el optimizador determine los proyectos de generación más económicos para el abastecimiento de la demanda, aspecto que se demuestra en el análisis de resultados.
- De los resultados energéticos, se concluye que el modelo de optimización permite escoger una oferta asociada a un ofertante cuyas combinaciones garantizan el abastecimiento energético de la demanda, para el efecto las ofertas propuestas deben ser hechas para la entrega de la totalidad de la energía generada.
- De los resultados y del análisis de las subastas se valida que es un mecanismo propicio para promover tecnologías renovables cuyos proyectos son más sencillos de desarrollar y poner en marcha, además permiten reflejar la reducción del costo de tecnologías disruptivas en el recorrido por su curva de aprendizaje, lo cual no es tan pronunciado en tecnologías maduras como las utilizadas para la producción de electricidad.
- Finalmente, se señala que la eficiencia en la subasta se basa en asegurar competencia, a este respecto son claves determinar a nivel del Estado los objetivos de la implementación de generación a medio y largo plazo, la

regularidad en la realización de las subastas y aplicar la máxima transparencia en el proceso.

6.1 Trabajos futuros

Con base a lo analizado en el presente trabajo se propone realizar nuevas investigaciones relacionadas a las siguientes temáticas:

- Implementación de mecanismos de mercado y determinación de estrategias de licitación para el mercado incluyendo energía convencional y renovable.
- Diseño de subastas para usar la flexibilidad en la energía asociada a la demanda.
- Implementación de mecanismos de subasta para el comercio de energía en sistemas multienergéticos.
- Análisis del comercio de energía basado en subastas en el mercado de energía con participación activa de prosumidores y consumidores.
- Determinación de estrategias y simulación de subastas iterativas de múltiples productos en contratos de energía.
- Elaboración de subastas para el comercio de energía utilizando blockchains.
- Implementación de subastas para la implementación de contratos para asegurar la adecuación del suministro en un entorno energético incierto.
- Análisis para satisfacer la demanda pico de electricidad a través de la subasta combinatoria inversa utilizando energía renovable.

7 Referencias

- [1] C. Vázquez, M. Rivier, and I. Pérez, “Modelos de subastas para mercados eléctricos,” *An. Mecánica y Electr.*, pp. 34–44, 2001.
- [2] Y. S. Son, R. Baldick, K. H. Lee, and S. Siddiqi, “Short-term electricity market auction game analysis: Uniform and pay-as-bid pricing,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 4, pp. 1990–1998, 2004.
- [3] S. A. Rashidaee and T. Amraee, “Generation Expansion Planning Considering the Uncertainty of Yearly Peak Loads,” *Proc. - 2018 IEEE Int. Conf. Environ. Electr. Eng. 2018 IEEE Ind. Commer. Power Syst. Eur. IEEEIC/ CPS Eur. 2018*, pp. 2018–2021, 2018.
- [4] J. L. Ceciliano Meza, M. B. Yildirim, and A. S. M. Masud, “A multiobjective evolutionary programming algorithm and its applications to power generation expansion planning,” *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Part A Systems Humans*, vol. 39, no. 5, pp. 1086–1096, 2009.
- [5] S. Dehghan, N. Amjady, and A. Kazemi, “Two-stage robust generation expansion planning: A mixed integer linear programming model,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 2, pp. 584–597, 2014.
- [6] S. Kannan, N. Prasad, and S. Slochanal, “Application and Comparison of Metaheuristic Techniques to Generation Expansion Planning Problem,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 1, pp. 466–475, 2005.
- [7] G. Salazar and V. Hinojosa, “Licitaciones De Energía Eléctrica Y Teoría De Subastas,” *Rev. Técnica “Energía,”* vol. 3, no. 1, pp. 16–26, 2007.
- [8] S. de E. SE, “Manual de Subastas a Largo Plazo- México,” *D. Of.*, pp. 7–12, 2015.
- [9] C. N. de energía E. CNEE,

- “Resolución guatemala CNEE 037 2011.” pp. 11–25.
- [10] E. A. Roubik Rojas, “Subastas de Energía Eléctrica en Chile: Modelamiento en Base a un Supuesto Sobre la Valoración de Contratos a Través de Portafolios Optimos,” 2008.
- [11] N. Fukuta and T. Ito, “Toward combinatorial auction-based better electric power allocation on sustainable electric power systems,” *Proc. - 13th IEEE Int. Conf. Commer. Enterp. Comput. CEC 2011*, pp. 392–399, 2011.
- [12] N. S. Costa, F. O. S. Saraiva, and V. L. Paucar, “Comparative analysis of game theory application to various types of auctions in electric markets,” *CACIDI 2016 - Congr. Argentino Ciencias la Inform. y Desarro. Investig.*, 2016.
- [13] D. L. Post, S. Coppinger, and G. Sheblé, “Application of Auctions as a Pricing Mechanism for the Interchange of Electric Power,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. PE-2, no. 3, pp. ni11–ni11, 2009.
- [14] J. Wu *et al.*, “Study on medium and long-term generation expansion planning method considering the requirements of green low-carbon development,” *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, vol. 2018-Octob, pp. 689–694, 2018.
- [15] Y. Kim, “Multicriteria Generation-Expansion Considerations T ”,” *IEEE Trans. Emerg. Manag.*, vol. 40, no. 2, pp. 154–161, 1993.
- [16] J. Carrera, “Óptima Planificación de la expansión de generación eléctrica usando GAMS,” *Tesis*, vol. 1, pp. 66–80, 2017.
- [17] T. Guoqing, M. Ieee, L. I. U. Fubin, L. I. Yang, W. Bin, and F. U. Rong, “Risk-Based Assessment and Decision Making of Power System Security in Power Market,” *2014 IEEE Conf. Electr. Util. Deregulation, Restruct. Power Technol.*, no. April, pp. 551–555, 2004.
- [18] E. Gnansounou, J. Dong, S. Pierre, and A. Quintero, “Market Oriented Planning of Power Generation Expansion using Agent-based Model,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, no. 0041, pp. 1–6.
- [19] Y. Ding, C. Singh, and L. Goel, “Short-Term and Medium-Term Reliability Evaluation for Power Systems With High Penetration of Wind Power,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 3, pp. 896–906, 2014.
- [20] D. B. Fogel, “An Introduction to Simulated Evolutionary Optimization,” *Ieee Trans. Neural Networks*, vol. 5, no. 1, 1994.
- [21] S. Slochanal, S. Kannan, and R. Rengaraj, “Generation expansion planning in the competitive environment,” *2004 11th Int. Conf. Harmon. Qual. Power (IEEE Cat. No.04EX951)*, no. November, pp. 21–24, 2004.
- [22] L. Moreno, “Reglamento General de la Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica,” *Regist. Of.*, no. 21, p. 44, 2019.
- [23] A. N. del Ecuador, “Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica,” pp. 1–28, 2015.
- [24] MERNNR, “Plan Maestro de la Electricidad- Expansión de la generación.”
- [25] J. I. Peña and R. Rodriguez, “Default supply auctions in electricity markets: Challenges and proposals,” *Energy Policy*, vol. 122, no. October 2017, pp. 142–151, 2018.
- [26] H. Liu, L. Tesfatsion, and A. A. Chowdhury, “Locational marginal

- pricing basics for restructured wholesale power markets,” *2009 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet. PES '09*, pp. 1–8, 2009.
- [27] Y. Zhang, Z. Zhang, Q. Yang, D. An, D. Li, and C. Li, “EV charging bidding by multi-DQN reinforcement learning in electricity auction market,” *Neurocomputing*, vol. 397, pp. 404–414, 2020.
- [28] M. Bagherpour, “Evaluation of margining solutions for the power market spot products,” *Int. Conf. Eur. Energy Mark. EEM*, 2014.
- [29] F. Kunz, F. Leuthold, M. Baumgärtner, C. Seeliger, and L. Stolze, “Applying experiments to auctions in electricity markets,” *2008 5th Int. Conf. Eur. Electr. Mark. EEM*, pp. 3–7, 2008.
- [30] N. Mazzi, A. Lorenzoni, S. Rech, and A. Lazzaretto, “Electricity auctions: A European view on markets and practices,” *Int. Conf. Eur. Energy Mark. EEM*, vol. 2015-Augus, 2015.
- [31] G. C. Lazaroiu, V. Dumbrava, M. Costoiu, and M. Roscia, “Game theory and competitive aspects in electricity markets,” *Conf. Proc. - 2017 17th IEEE Int. Conf. Environ. Electr. Eng. 2017 1st IEEE Ind. Commer. Power Syst. Eur. IEEEIC / I CPS Eur. 2017*, pp. 1–6, 2017.
- [32] V. P. Gountis and A. G. Bakirtzis, “Bidding Strategies for Electricity Producers in a Competitive Electricity Marketplace,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 1, pp. 356–365, 2004.
- [33] B. E. B. Xavier, D. A. V. Gonçalves, B. H. Dias, and B. S. M. C. Borba, “Electricity Auction Simulation Platform for Learning Competitive Energy Markets,” *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, p. 625, 2008.
- [34] M. Zeng, F. Luan, J. Zhang, B. Liu, and Z. Zhang, “Improved Ant Colony Algorithm(ACA) and game theory for economic efficiency evaluation of electrical power market,” *2006 Int. Conf. Comput. Intell. Secur. ICCIAS 2006*, vol. 1, pp. 849–854, 2006.
- [35] MERNNR, “Plan Maestro de Electricidad 2019-2027,” *Minist. Energía y Recur. No Renov.*, p. 390, 2019.
- [36] IRENA, *Renewable Power Generation Costs in 2019*. 2014.

7.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 13. Matriz de estado del arte

ÓPTIMA DETERMINACIÓN DE POTENCIA PARA ABASTECER LA DEMANDA EN EL MEDIANO PLAZO A TRAVÉS DE SUBASTAS INVERSAS DE ENERGÍA USANDO PROGRAMACIÓN LINEAL (LP)																									
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE RESOLUCIÓN			SOLUCIÓN PROPUESTA								
				Subastas de energía	Planificación de la expansión de generación	Modelos para la determinación del crecimiento de la demanda eléctrica	Impacto económico por la incorporación de	Abastecimiento de la demanda en el mediano y largo plazo	Implementación de modelos de optimización para subastas de energía	Incorporación de nuevos proyectos de generación	Evaluación energética en el abastecimiento de la	Evaluación de los costos asociados por la incorporación de nueva generación	Cantidad de proyectos de generación a subastarse	Determinación de la demanda energética a ser abastecida	Cantidad de ofertas a ser propuestas por el oferente	Asignación de Ofertas a los proyectos de generación	Maximización del excedente económico	Determinación de los proyectos de generación potenciales a incorporarse al sistema por subastas	Determinación de la demanda energética a ser abastecida por las subastas	Selección de los proyectos de generación y asignación de ofertas	Modelo de optimización para incorporar generación por subastas de energía	Implementación de generación considerando subastas combinatorias	Determinación de parámetros que validen la modelación del sistema	Evaluación energética y económica por la incorporación de la nueva generación	
1	2004	Short-term electricity market auction game analysis: Uniform and pay-as-bid pricing	102	☒			☒		☒		☒	☒			☒										
2	2018	Study on medium and long-term generation expansion planning method considering the requirements of green low-carbon development	2		☒		☒	☒			☒	☒												☒	
3	2018	Generation Expansion Planning Considering the Uncertainty of Yearly Peak Loads	3	☒	☒		☒		☒	☒	☒		☒		☒							☒		☒	
4	2009	A multiobjective evolutionary programming algorithm and its applications to power generation expansion planning	85		☒	☒		☒			☒	☒			☒										☒
5	2013	Two-stage robust generation expansion planning: A mixed integer linear programming model	99			☒		☒			☒	☒			☒	☒								☒	
6	2005	Application and Comparison of Metaheuristic Techniques to Generation Expansion Planning Problem	268		☒		☒		☒													☒		☒	☒
7	1993	Multicriteria Generation-Expansion Considerations T	67		☒		☒				☒											☒	☒		☒
8	2017	Óptima Planificación de la expansión de generación eléctrica usando GAMS	0	☒			☒	☒		☒				☒								☒		☒	☒
9	2004	Risk-Based Assessment and Decision Making of Power System Security in Power Market	6	☒			☒	☒		☒					☒										☒

ÓPTIMA DETERMINACIÓN DE POTENCIA PARA ABASTECER LA DEMANDA EN EL MEDIANO PLAZO A TRAVÉS DE SUBASTAS INVERSAS DE ENERGÍA USANDO PROGRAMACIÓN LINEAL (LP)

ITEM	DATOS		TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE RESOLUCIÓN			SOLUCIÓN PROPUESTA							
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Subastas de energía	Planificación de la expansión de generación	Modelos para la determinación del crecimiento de la demanda eléctrica	Impacto económico por la incorporación de	Abastecimiento de la demanda en el mediano y largo plazo	Implementación de modelos de optimización para subastas de energía	Incorporación de nuevos proyectos de generación	Evaluación energética en el abastecimiento de la	Evaluación de los costos asociados por la incorporación de nueva generación	Cantidad de proyectos de generación a subastarse	Determinación de la demanda energética a ser abastecida	Cantidad de ofertas a ser propuestas por el oferente	Asignación de Ofertas a los proyectos de generación	Maximización del excedente económico	Determinación de los proyectos de generación potenciales a incorporarse al sistema por subastas	Determinación de la demanda energética a ser abastecida por las subastas	Selección de los proyectos de generación y asignación de ofertas	Modelo de optimización para incorporar generación por subastas de energía	Implementación de generación considerando subastas combinatorias	Determinación de parámetros que validen la modelación del sistema	Evaluación energética y económica por la incorporación de la nueva generación
10	2004	Market Oriented Planning of Power Generation Expansion using Agent-based Model	52	☒			☒	☒	☒			☒	☒		☒				☒	☒	☒		☒	
11	2014	Short-Term and Medium-Term Reliability Evaluation for Power Systems With High Penetration of Wind Power	72				☒		☒	☒	☒	☒							☒			☒	☒	
12	1994	An Introduction to Simulated Evolutionary Optimization	2082	☒	☒		☒		☒	☒		☒			☒				☒	☒	☒		☒	
13	2004	Generation expansion planning in the competitive environment	24	☒		☒	☒	☒			☒		☒		☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒	☒	☒
14	2019	Reglamento General de la Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica	2	☒	☒	☒		☒	☒		☒	☒	☒		☒	☒		☒		☒		☒	☒	
15	2015	Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica	17	☒	☒			☒	☒			☒	☒			☒		☒		☒	☒	☒	☒	☒
16	2018	Plan Maestro de la Electricidad- Expansión de la generación	0	☒	☒	☒		☒		☒			☒		☒			☒		☒		☒	☒	
17	2018	Default supply auctions in electricity markets: Challenges and proposals	1	☒	☒			☒			☒	☒	☒		☒	☒	☒				☒	☒	☒	
18	2009	Locational marginal pricing basics for restructured wholesale power markets	52	☒		☒		☒			☒	☒	☒		☒	☒		☒				☒	☒	

ÓPTIMA DETERMINACIÓN DE POTENCIA PARA ABASTECER LA DEMANDA EN EL MEDIANO PLAZO A TRAVÉS DE SUBASTAS INVERSAS DE ENERGÍA USANDO PROGRAMACIÓN LINEAL (LP)

ITEM	DATOS		TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE RESOLUCIÓN			SOLUCIÓN PROPUESTA								
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Subastas de energía	Planificación de la expansión de generación	Modelos para la determinación del crecimiento de la demanda eléctrica	Impacto económico por la incorporación de	Abastecimiento de la demanda en el mediano y largo plazo	Implementación de modelos de optimización para subastas de energía	Incorporación de nuevos proyectos de generación	Evaluación energética en el abastecimiento de la demanda	Evaluación de los costos asociados por la incorporación de nueva generación	Cantidad de proyectos de generación a subastarse	Determinación de la demanda energética a ser abastecida	Cantidad de ofertas a ser propuestas por el oferente	Asignación de Ofertas a los proyectos de generación	Maximización del excedente económico	Determinación de los proyectos de generación potenciales a incorporarse al sistema por subastas	Determinación de la demanda energética a ser abastecida por las subastas	Selección de los proyectos de generación y asignación de ofertas	Modelo de optimización para incorporar generación por subastas de energía	Implementación de generación considerando subastas combinatorias	Determinación de parámetros que validen la modelación del sistema	Evaluación energética y económica por la incorporación de la nueva generación
19	2020	EV charging bidding by multi-DQN reinforcement learning in electricity auction market	0			☒		☒			☒	☒	☒			☒	☒				☒	☒	☒	
20	2007	Licitaciones De Energía Eléctrica Y Teoría De Subastas	0	☒	☒		☒		☒		☒		☒					☒				☒		
21	2014	Evaluation of margining solutions for the power market spot products	1	☒	☒	☒		☒	☒		☒		☒									☒		
22	2008	Applying experiments to auctions in electricity markets	4	☒		☒	☒	☒			☒	☒	☒					☒	☒					
23	2015	Electricity auctions: A European view on markets and practices	5	☒		☒		☒			☒		☒					☒				☒		
24	2017	Game theory and competitive aspects in electricity markets	3	☒		☒		☒			☒	☒	☒					☒	☒		☒	☒		☒
25	2004	Bidding Strategies for Electricity Producers in a Competitive Electricity Marketplace	262	☒	☒		☒	☒	☒												☒	☒		☒
26	2001	Modelos de subastas para mercados eléctricos	5		☒		☒	☒		☒		☒							☒	☒				☒
27	2017	Electricity Auction Simulation Platform for Learning Competitive Energy Markets	1		☒		☒		☒	☒	☒	☒							☒	☒				☒

ÓPTIMA DETERMINACIÓN DE POTENCIA PARA ABASTECER LA DEMANDA EN EL MEDIANO PLAZO A TRAVÉS DE SUBASTAS INVERSAS DE ENERGÍA USANDO PROGRAMACIÓN LINEAL (LP)

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA					FORMULACION DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE RESOLUCIÓN			SOLUCIÓN PROPUESTA			
				Subastas de energía	Planificación de la expansión de generación	Modelos para la determinación del crecimiento de la demanda eléctrica	Impacto económico por la incorporación de	Abastecimiento de la demanda en el mediano y largo plazo	Implementación de modelos de optimización para subastas de energía	Incorporación de nuevos proyectos de generación	Evaluación energética en el abastecimiento de la	Evaluación de los costos asociados por la incorporación de nueva generación	Cantidad de proyectos de generación a subastarse	Determinación de la demanda energética a ser abastecida	Cantidad de ofertas a ser propuestas por el oferente	Asignación de Ofertas a los proyectos de generación	Maximización del excedente económico	Determinación de los proyectos de generación potenciales a incorporarse al sistema por subastas	Determinación de la demanda energética a ser abastecida por las subastas	Selección de los proyectos de generación y asignación de ofertas	Modelo de optimización para incorporar generación por subastas de energía
28	2006	Improved Ant Colony Algorithm (ACA) and game theory for economic efficiency evaluation of electrical power market	7	☒					☒	☒		☒	☒					☒	☒		☒
29	2018	Plan Maestro de Electricidad 2019-2027	0	☒	☒				☒	☒		☒			☒			☒	☒		☒
30	2019	Renewable Power Generation Costs in 2019 - IRENA	3	☒		☒		☒	☒		☒	☒	☒		☒	☒		☒		☒	☒

CANTIDAD:	21	16	12	16	17	16	16	11	17	21	18		13	8	10	10	11	15	16	11	17
------------------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	--	----	---	----	----	----	----	----	----	----

7.2 Resumen de Indicadores

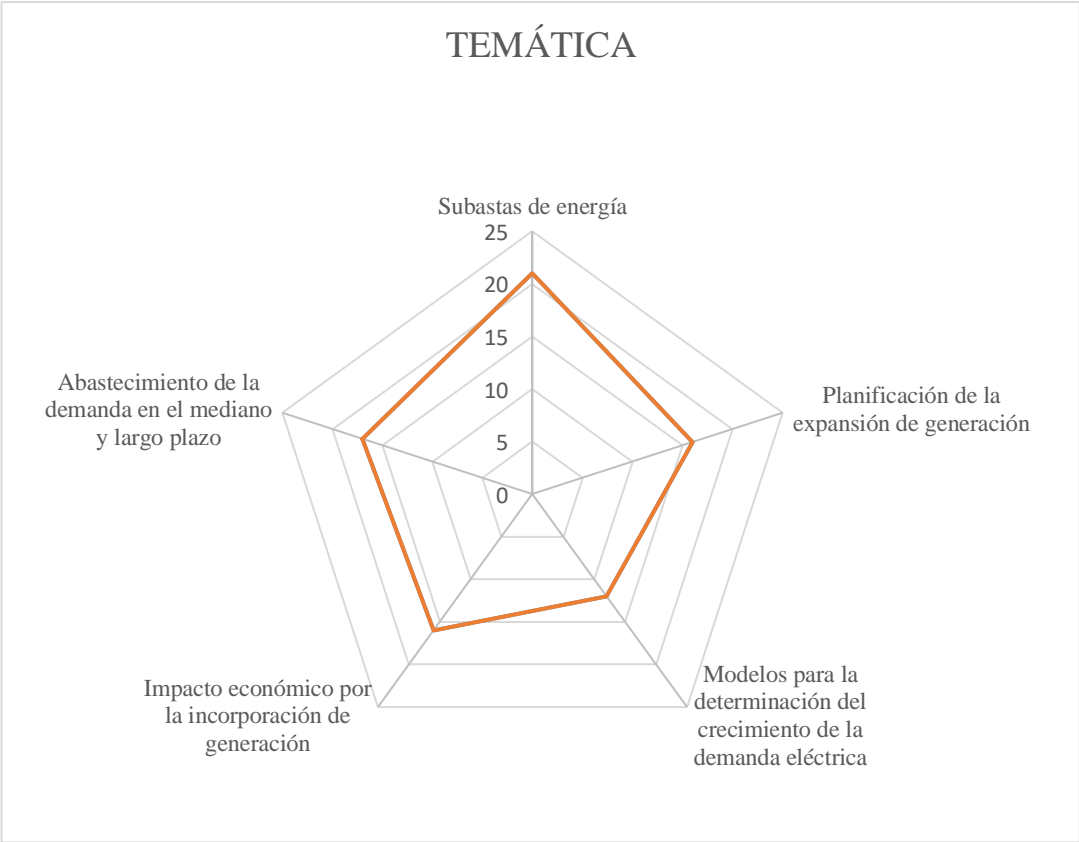


Figura 15. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

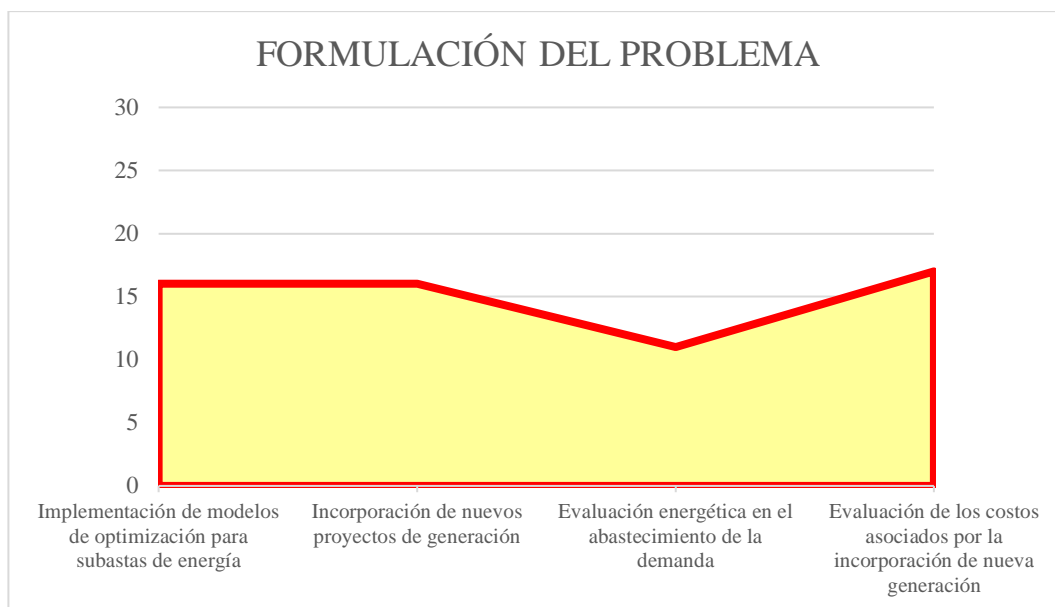


Figura 16. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

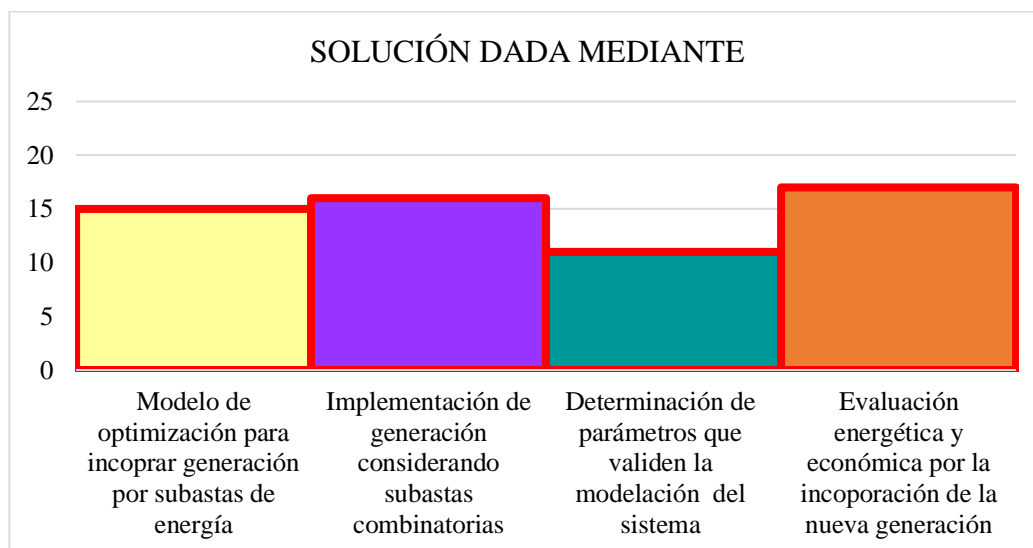


Figura 17. Indicador de solución - Estado del arte.