

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA SUBASTAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE MEDIANO PLAZO CONSIDERANDO RESTRICCIÓN PARA EVITAR SOBRECOSTOS

Dr. Carlos Javier Sosa Paz
Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco
Email: csosa@ipn.mx
<https://orcid.org/0000-0002-9683-1372>

Ing Rubén Martínez López
Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco
Email: rmartinezl2200@alumno.ipn.mx
<https://orcid.org/0009-0006-9819-7228>

Resumen— El presente trabajo tiene como objetivo presentar los avances para realizar un análisis del modelo matemático empleado en las subastas de energía eléctrica y potencia, tal como se describe en el Manual de Subastas de Mediano Plazo publicado por la Secretaría de Energía. El propósito principal es comprender este modelo y su relación con el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM), considerando sus términos y restricciones. Una vez comprendido, se propone un modelo alternativo que integre una restricción de precios. Este enfoque implica descartar ofertas que se sitúen por debajo de los precios de referencia establecidos anualmente por diversas organizaciones. La finalidad de esta propuesta es evitar la adjudicación de posibles contratos que podrían desencadenar incrementos excesivos en los precios, lo que eventualmente podría nuevamente afectar negativamente las finanzas públicas. Además, se busca fomentar subastas más equitativas y competitivas en el ámbito energético. La metodología empleada consiste en la resolución de un problema de programación lineal a través del uso de la herramienta CPLEX. Finalmente, una vez implementado el modelo de optimización con la nueva restricción para evitar sobreprecios, se compararán los resultados obtenidos en la subasta de mediano plazo realizada por el Gobierno con los resultados obtenidos a través del modelo mejorado. Esta comparación permitirá determinar si el oferente ganador seleccionado realmente representaba la mejor opción dentro del proceso de subasta.

Palabras Clave — Optimización, programación lineal, subastas, mediano plazo.

Abstract- This paper presents the progress made in analyzing the mathematical model used in electricity and power auctions, as described in the Medium-Term Auction Manual published by the Ministry of Energy. The main objective is to understand this model and its relationship to the Wholesale Electricity Market (MEM), considering its terms and restrictions. Once this is understood, an alternative model is proposed that incorporates a price restriction. This approach involves discarding bids that fall below the reference prices established annually by various organizations. The purpose of this proposal is to avoid the awarding of potential contracts that could trigger excessive price increases, which could eventually negatively impact public finances. Furthermore, it seeks to promote more equitable and competitive auctions in the energy sector. The methodology used consists of solving a linear programming problem using the CPLEX tool. Finally, once the optimization model with the new restriction to prevent overpricing has been implemented, the results obtained in the government's mid-term auction will be compared with the results obtained through the improved model. This comparison will determine whether the selected winning bidder truly represented the best option within the auction process.

I. INTRODUCCIÓN

Desregulación de los mercados eléctricos

En el sector eléctrico debido a la relación que existe entre la generación, transmisión y distribución tiende a que se monopolice el servicio, observándose una estructura vertical, que regularmente es creada por el gobierno.

Conforme la economía de un país avanza, se busca una disminución de los precios de la electricidad, así como una red robusta y confiable que permita atender la futura demanda que se presente. Para el cumplimiento de estos objetivos es necesaria

una fuerte inversión para mejorar y robustecer el sistema eléctrico nacional, para ello el gobierno opta por comenzar un proceso de descentralización que apertura la libre competencia a empresas privadas para que participen en los procesos de generación transmisión, distribución y comercialización, y con todo ello, crear un mercado eléctrico competitivo. Es importante mencionar que cada país adapta el mercado a las necesidades que requiera [1].

En 1982 Chile fue el primer país en descentralizar su sector eléctrico, y es durante los años noventa que diversos países comenzaron a hacer lo propio con sus sistemas eléctricos; en 1990 Reino Unido, en 1992 tuvo lugar la descentralización en Perú, Argentina y Nueva Zelanda, en 1994 Colombia hace lo propio con su sector y en 1996 Australia también se descentraliza, para finales de los años 90 Brasil y España se descentralizan, Estados Unidos y Nueva Inglaterra en 1997, California en 1998 y Texas e Illinois en 1999. [2][3].

Subastas y tipos de subastas para el mercado eléctrico

De manera general y de acuerdo con la definición de la RAE [4], podemos definir la subasta como sigue:

“Adjudicación de un contrato, generalmente de servicio público, como la ejecución de una obra, el suministro de provisiones, etc., a quien presenta la propuesta más ventajosa”

La manera más común en que funcionan las subastas es que se tienen varios compradores interesados en un productor y el ganador será aquel cuya proposición tenga el mayor valor. Para el caso de las subastas en el sector eléctrico los vendedores ofrecen sus productos y siendo ganadores cuando ofrecen los precios más competitivos, es decir, los de menor precio. Este tipo de subastas se conocen como subastas inversas o descendentes [5].

Los tipos más comunes de subastas utilizadas en el sector eléctrico son las siguientes:

a) Oferta cerrada: Se utiliza cuando hay varias unidades del mismo producto, lo que resulta en diferentes precios, donde a través de una subasta de oferta cerrada, en la cual cada uno de los postores presenta su oferta con los precios y cantidades que propone para su venta. El subastador reúne las ofertas, y a través de una curva de oferta agregada, compara contra la cantidad que se va a adquirir. Los ganadores serán todos aquellos que tengan los precios más bajos hasta cubrir la demanda requerida. Los ganadores reciben diferentes precios en función de sus ofertas, allí el nombre de pago por oferta (paid as bid).

b) Reloj descendente: Es un tipo de subasta dinámica, debido a que el precio se determinará a través de un proceso que avanza por medio de múltiples rondas de ofertas. Su funcionamiento es el siguiente.

1. El subastador propone un precio inicial y pregunta a los oferentes la cantidad de producto que están dispuestos a vender por ese valor, esto se conoce como la primera ronda.

2. Si la cantidad ofertada por los vendedores al precio propuesto es mayor al requerido, el subastador propone un precio más bajo que el anterior y vuelve a preguntar a los

oferentes la cantidad de producto que están dispuestos a vender a ese valor. Lo anterior corresponde a la segunda ronda.

3. Se repite el procedimiento anterior, realizando las rondas necesarias hasta que la cantidad de producto ofertada sea igual a la requerida, o hasta que la diferencia entre ambas sea muy pequeña.

c) Híbridas: Con este tipo de subasta se busca combinar dos fases de subasta diferentes entre ellas, buscando provecho de las características más interesantes de cada una.

d) Combinatorias: Permite a los vendedores ofertar combinaciones o paquetes de productos que se requieren. El producto, a modo individual o como parte de una oferta de paquete, se puede adjudicar como máximo una vez, por lo que el objetivo del subastador es seleccionar el conjunto de ofertas de todos los ofertantes que minimicen los pagos del subastador a los licitantes, considerando la restricción de que cada producto no se adjudica más de una vez. Es posible añadir otras reglas de precios en estas subastas, como la de pago por oferta.

El principal propósito de las subastas es que la oferta y demanda de productos eléctricos sean rentables, pero también pueden servir para otros objetivos:

a) Reducir la brecha existente entre la oferta y la demanda aumentando la capacidad de generación;

b) Mantener o reemplazar la capacidad de generación existente;

c) Suministrar energía a clientes que optaron por no ser atendidos por proveedores alternativos;

d) Reducir los derechos de capacidad de generación a través de proveedores recién llegados, lo que provoca que haya una descentralización del mercado.

Los antecedentes de subastas de electricidad que se tienen son de nivel internacional, y por mencionar algunos, se describen brevemente a continuación [1]:

a) Perú, pago por oferta utilizado desde 2010 donde las ofertas son separadas por tecnología y a su vez son ordenadas de menor a mayor por orden de precio y se adjudican en el orden hasta cubrir la energía requerida de la correspondiente tecnología.

b) Colombia, reloj descendente, utilizada con el fin de promover el precio más eficiente para la energía que se entrega hora por hora.

c) Brasil, subastas híbridas: Utiliza subastas de tipo reloj descendente en su primera fase y para la segunda fase de tipo pago por oferta. Con la primera fase busca cubrir la mayoría del producto requerido, pero antes de llegar, se pasa a la segunda fase, en la cual se usa la subasta de tipo pago por oferta. La finalidad de esta modalidad híbrida es disminuir el precio final lo mayor posible.

d) Chile, subastas combinadas: Son utilizadas en ese país para abastecer la demanda a través de nuevos proyectos de generación. Utilizan un diseño combinatorio que busca

minimizar el precio nivelado medio ponderado del conjunto conformado por los bloques de suministro.

Por su parte en México, el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) hasta antes de la Reforma Energética en 2013 era Centralizado y la Comisión Federal de Electricidad (CFE) era la encargada de la Generación, Transmisión y Distribución de la energía eléctrica en México. La inversión privada se encontraba en el área de generación de electricidad, a través de los Productores Independientes de Electricidad (PIE) quienes vendían energía a CFE a través de contratos de compraventa exclusivos, pequeños productores (menores a 30MW) y generadores de autoabasto los cuales podían generar electricidad y venderla únicamente a sus socios consumidores [3].

La Ley de la Industria Eléctrica (LIE) [6] aprobada el 11 de agosto de 2014, estableció el nuevo marco normativo que rige al sector eléctrico, el cual determina que se conservan como áreas estratégicas reservadas para el estado la planeación y control del Sistema Eléctrico Nacional, la Transmisión y Distribución de energía eléctrica; dejando abierta la competencia para las actividades de generación y comercialización, de acuerdo con las modificaciones a los artículos 27 y 28 de la Constitución Política de México.

Las bases para el mercado [7] incluyen tres tipos de subastas: subastas de corto, mediano y largo plazo, en el presente trabajo se dará énfasis a las subastas de mediano plazo.

Subastas de Mediano Plazo (SMP)

Se llevan a cabo anualmente con el objeto de asignar contratos para potencia y energía con duración máxima de 3 años, iniciando el 1ro de enero del próximo año siguiente a aquel en el que se lleva a cabo la subasta. En este tipo de subastas la energía se vende en zonas de carga agrupadas. Cabe resaltar que este tipo de subastas están dirigidas para proyectos de generación (centrales) ya existentes, comparado con las subastas de largo plazo, las cuales están orientadas a nuevos proyectos.

Las subastas de mediano plazo tienen por objetivo [8]:

a) Permitir a los Suministradores de Servicios Básicos celebrar Contrato de Cobertura Eléctrica en forma competitiva y en condiciones de prudencia, para que los Suministradores de Servicios Básico satisfagan las necesidades de Potencia y Energía en el mediano plazo, a fin de reducir o eliminar su exposición a los precios de estos productos en el corto plazo, así como cumplir con los requisitos de cobertura eléctrica que establezca la CRE,

b) Permitir a cualquier Participante de Mercado participar en ellas cuando así lo decidan a fin de celebrar contratos de Cobertura Eléctrica para adquirir Productos de Potencia y/o Energía;

c) Permitir a los Generadores presentar Ofertas de Venta de Productos de Energía a fin de reducir o eliminar su exposición a los precios de estos productos en el corto plazo, y presentar Ofertas de Venta de Productos de Potencia que no se tenga comprometida,

d) Permitir que los Comercializadores no Suministradores presenten Ofertas de Venta de Productos de Energía que sirvan de cobertura eléctrica para las Entidades Responsables de Carga;

e) Permitir a cualquier Participante del Mercado presentar Ofertas de Venta de Productos de Potencia y Energía correspondientes a sus excedentes de Potencia y Productos de Energía

II. ANÁLISIS DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LAS SUBASTAS DE MEDIANO PLAZO

El problema de optimización de la Subasta de Mediano Plazo contiene tres tipos de conjuntos de restricciones, las cuales se mencionan a continuación:

El primer conjunto equivale a las cotas superiores e inferiores para las variables de decisión, las cuales de acuerdo con lo definido en el manual de Subastas son las siguientes:

La primera restricción acota las cantidades de Potencia entre cero y el parámetro correspondiente a cada oferta, por lo que ninguna Entidad Responsable de Carga podrá comprar en una Zona de Potencia (w_p), una cantidad mayor a la cantidad que ofreció comprar en una oferta dada (\bar{w}_p), es decir:

$$0 \leq w_p \leq \bar{w}_p \quad \forall p \in P \quad (1)$$

La segunda restricción nos dice que, para Energía, ninguna Entidad Responsable de Carga comprará una cantidad de algún producto en el bloque de carga base, intermedia o punta, en una Zona de Carga Agrupada (y_m), mayor a la cantidad que ofreció comprar en una oferta dada (\bar{y}_m), es decir:

$$0 \leq y_m \leq \bar{y}_m \quad \forall m \in M \quad (2)$$

La tercera restricción indica que, para Potencia, ningún Generador venderá una cantidad mayor a la que ofreció vender en cada Zona de Potencia q_r para cada oferta dada (\bar{q}_r):

$$0 \leq q_r \leq \bar{q}_r \quad \forall r \in R \quad (3)$$

La cuarta restricción indica que para Energía ningún Generador venderá una cantidad de producto en cada bloque de carga, en cada Zona de Carga Agrupada (x_n), mayor a la cantidad que ofreció vender en una oferta dada (\bar{x}_n). Estos productos se expresan como porcentaje de la demanda del Sistema Interconectado, lo cual se define mediante:

$$0 \leq x_n \leq \bar{x}_n \quad \forall n \in N \quad (4)$$

El segundo conjunto de restricciones corresponde a un conjunto de cotas superiores para la venta de Energía. Los generadores declararán la cantidad máxima de Energía que

ofrecen vender en la Subasta a diferentes niveles, lo cual se puede representar con las siguientes ecuaciones:

Ningún generador venderá una cantidad total de Energía mayor a la cantidad que ofreció vender:

$$\sum_{b \in B} \sum_{v \in V} \sum_{n \in N_{gbvi}} f_{gbvi} * x_n \leq \overline{MW}_{gi} \quad \forall g \in G; \forall i \in I \quad (5)$$

Ningún generador venderá una cantidad de Energía, por bloque de carga, mayor a la cantidad que ofreció vender:

$$\sum_{v \in V} \sum_{n \in N_{gbvi}} f_{gbvi} * x_n \leq \overline{MW}_{B_{gbi}} \quad \forall g \in G; \forall b \in B; \forall i \in I \quad (6)$$

Ningún generador venderá una cantidad de Energía, por Zona de carga agrupada, mayor a la cantidad que ofreció vender:

$$\sum_{b \in B} \sum_{n \in N_{gbvi}} f_{gbvi} * x_n \leq \overline{MW}_{V_{gvi}} \quad \forall g \in G; \forall v \in V; \forall i \in I \quad (7)$$

Es importante aclarar para (5), (6) y (7) las cantidades ofrecidas están expresadas en un porcentaje de la demanda del Sistema Interconectado se convierten en MWh con base en los parámetros de la oferta del Generador.

El último conjunto de restricciones corresponde a un conjunto de igualdades a cero:

La cantidad comprada de cada producto de energía será igual a la cantidad vendida de cada producto de energía, por Zona de Carga Agrupada y por bloque de carga en cada año:

$$\sum_{e \in E} \sum_{m \in M_{ebvi}} y_m - \sum_{g \in G} \sum_{n \in N_{gbvi}} x_n = 0 \quad \forall v \in V; \forall b \in B; \forall i \in I \quad (8)$$

Para cada zona de potencia, la cantidad de Potencia comprada será igual a la cantidad vendida en dicha zona, en cada año:

$$\left(\sum_{e \in E} \sum_{p \in P_{ezi}} w_p \right) - \left(\sum_{g \in G} \sum_{d \in D_z} \sum_{r \in R_{gdi}} C_{r,z} \right) = 0 \quad \forall z \in Z; \forall i \in I \quad (9)$$

Finalmente, de acuerdo con los conjuntos de restricciones de (1) a (9), la función objetivo está definida mediante la siguiente expresión matemática:

Maximizar:

$$\sum_{p \in P} P W_p * w_p - \sum_{r \in R} P Q_r * q_r + \sum_{m \in M} P Y_m * y_m - \sum_{n \in N} P X_n * x_n \quad (10)$$

La función objetivo tiene como fin encontrar una estrategia de decisión óptima que maximice el excedente total, es decir, se asigne la mayor cantidad de producto (Potencia o Energía) al oferente con los mejores precios. Esta decisión esta dada por la selección de ofertas de compra y venta tanto de Potencia como de Energía, la cual al revisar la ecuación (10) de restricción presentada en el manual [8] es posible resolverse con programación lineal a través de la herramienta CPLEX, la cual para este trabajo utilizó el método *simplex* para la resolución del problema de programación lineal.

III. PRUEBAS REALIZADAS AL MODELO DE SUBASTAS

Antes de modelar la nueva ecuación con restricción, es necesario recrear el programa y los resultados obtenidos en la única subasta realizada de mediano plazo, esto con la finalidad de comprobar que el nuevo modelo funcione plenamente sobre el modelo original y no produzca resultados erróneos.

Después de ejecutar el código que representa al modelo de optimización lineal usando los insumos oficiales de la 1ª Subasta de Mediano Plazo SMP-1/2017 se muestra en la Figura 1 parte del código del modelo de optimización lineal, así como la solución del mismo por medio de la herramienta CPLEX. Se encuentra el valor óptimo de la función objetivo.

```

Console
AMPL
ampl: reset;
ampl: model mediano_plazo.mod;
ampl: data mediano_plazo.dat;
ampl: option show_stats 1;
ampl: option omit_zero_rows 1;
ampl: option solver cplex;
ampl: option cplex_options 'siftopt';
ampl: solve;

Presolve eliminates 53 constraints and 11 variables.
Adjusted problem:
43 variables, all linear
15 constraints, all linear; 51 nonzeros
15 equality constraints
1 linear objective; 35 nonzeros.

CPLEX 22.1.1.0: siftopt
LP Presolve eliminated 5 rows and 20 columns.
Reduced LP has 6 rows, 19 columns, and 23 nonzeros.

Iteration log . . .
Sifting iteration 1 [ 19]: Objective = 32296574.595076

Iteration log . . .
CPLEX 22.1.1.0: optimal solution; objective 32296574.6
1 simplex iterations (0 in phase I)
ampl: |
    
```

Figura 1.- Captura de pantalla de la ejecución y resultado del modelo de SMP en AMPL.

Las restricciones impuestas al modelo de optimización de la primera subasta de mediano plazo, **operan de manera correcta** al no permitir violar los límites establecidos en la compra de Energía ya que de acuerdo a los resultados obtenidos nunca se

sobrepasó la cantidad de productos adquiridos del límite previamente establecido para las ecuaciones de restricción.

De acuerdo a las cantidades de productos ofrecidos por los participantes, se logró asignar de manera eficiente el **3.98% de la oferta de compra total de Potencia**, mientras que para energía no se obtuvo asignación. Estas cantidades **coinciden** con las reportadas por el Centro Nacional de Control de la Energía como resultado de la única subasta de mediano plazo.

IV. CONCLUSIONES

De acuerdo al análisis de cada una de las restricciones mostradas en (1) a (9) del manual de subastas de mediano plazo y con base en la función objetivo se puede concluir que el modelo de optimización de subastas de mediano plazo es coherente e integra todas las restricciones.

Los resultados del programa de optimización para la primera subasta de mediano plazo realizado usando como datos de entrada los archivos proporcionados por el CENACE arrojaron los mismos resultados que los expuestos en el evento oficial de la Subasta de Mediano plazo SMP-1/2017 celebrada el 23 de febrero del 2018 en las instalaciones del CENACE quedando por tanto validados el modelo de programación propuesto.

El siguiente paso es proponer el modelo matemático para la nueva restricción que considere la restricción por sobre costos, es decir, que no se permita la asignación de energía o potencia a ningún vendedor que ofrezca precios de potencia o energía por debajo de los precios de referencia que se tuvieron en 2017, para con ello, validar si dentro de las propuestas presentadas, existió un mejor proveedor que pudiera cumplir con un contrato de energía o potencia con mejores condiciones para el Estado.

Para lo anterior, se continúan realizando propuestas al modelo para su implementación en la ecuación matemática y en el modelo de programación lineal.

REFERENCIAS

- [1] Luiz T. A. Maurier and Luiz A. Barroso. *Electricity Auctions: An Overview of Efficient Practices*. The World Bank, 2011.
- [2] Unidad de Planeación Minero-Energética UPME, Análisis Comparativo Internacional de Precios de Electricidad en el Sector industrial, Julio de 2004.
- [3] Earle H O' Donnell and Daniel Hagan. *Electricity Regulation*, White & Case LLP, 2003.
- [4] REAL ACADEMIA ESPAÑOLA: Diccionario de la lengua española, 23.^a ed., [versión 23.7 en línea]. <<https://dle.rae.es>> [03 noviembre de 2023].
- [5] Stefania Gómez Sánchez, *Modelo de optimización para subastas de largo plazo de energía en México y un modelo con neutralidad tecnológica*, tesis de Maestría, noviembre de 2018.
- [6] Diario Oficial de la Federación, *Ley de la Industria Eléctrica*, Estados Unidos Mexicanos, 11 de agosto de 2014.
- [7] Diario Oficial de la Federación, *Bases del Mercado Eléctrico*, Estados Unidos Mexicanos, 08 de septiembre de 2015.
- [8] Diario Oficial de la Federación, *Manual de Subastas de Mediano Plazo*, Estados Unidos Mexicanos, 29 de mayo de 2017.

Consideraciones:

Los Autores del presente artículo, declaramos lo siguiente:

- La presentación de este artículo no presenta conflicto de interés de ninguna clase por parte de los autores, ni de la institución.
- No hay ningún interés familiar o de negocios en el proceso de elaboración del modelo matemático ni de programación lineal por parte de la institución ni de los autores.
- No se tiene relación alguna con las autoridades que llevaron a cabo el proceso anterior, en la que los autores o un tercero pudieran salir beneficiados.