

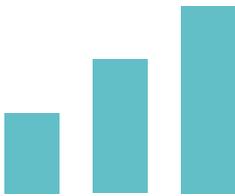
# MERCADO DE OPORTUNIDAD DE LA ENERGÍA EN GUATEMALA: UN MODELO TEÓRICO

Artículo

## Natalia Gómez-Cuevas

Administradora de empresas, Universidad Rafael Landívar y máster en Economía y Finanzas Cuantitativas, Banco de Guatemala- Universidad Rafael Landívar. Correo electrónico: nataliamgc@gmail.com

Fecha de recepción: 11/08/2016  
Fecha de aceptación: 12/09/2016



## Resumen

La eliminación del monopolio del gobierno en la generación, transmisión y distribución de la energía en Guatemala, se dio para poder abastecer la demanda de la misma, al hacer crecer la oferta a través de la competencia entre generadores.

Este trabajo de investigación modela al mercado de oportunidad de la energía en Guatemala, por medio de un juego de una subasta multiunidad de precio uniforme, en donde las estrategias de cada generador corresponden a la oferta de energía y el precio mínimo que están dispuestos a recibir por unidad.

Si los generadores no marginales ofertan a su costo marginal y la máxima generación por debajo o igual al precio del mercado; y, el generador marginal puede adoptar un comportamiento estratégico al ofertar por encima de su costo marginal, entonces se demuestra la existencia de un equilibrio de Nash.

**Palabras clave:** electricidad, energía, mercado *spot*, equilibrio de Nash, subasta multiunidad, precio uniforme, Guatemala.

## Abstract

*In Guatemala the demonopolization on generation, transmission and distribution of energy, was given because, the government wasn't able to attend the demand, to accomplish this, the supply grew by allowing competition amongst new private generators.*

*This research models Guatemala energy spot market, through a game of a multi-unit uniform price auction, where each generator's strategy is, the combination of a specific amount of energy and, the minimum price they are willing to bid per unit of energy.*

*If the non-marginal generators bid their marginal cost and, the quantity of energy they bid is the maximum generation they can produce, below or equal to, the market price and, the marginal generator can bid strategically by bidding above its marginal cost, then there exists a Nash equilibrium.*

**Keywords:** electricity, energy, spot market, Nash equilibrium, multi-unit auction, uniform price, Guatemala.

## Introducción

La reducción del control e intervencionismo del gobierno en la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica en distintos países, han permitido que exista un mayor nivel de competencia y eficiencia en el mercado mayorista de electricidad, lo cual también ha generado interés en cuanto a su diseño y análisis.

Al principio, no se había determinado que el mercado de electricidad funcionaba bajo el modelo de una subasta de un bien homogéneo divisible; ahora, sin embargo, se sabe que este mercado se entiende mejor a través de la teoría de subastas (Klemperer, 2000).

A partir de esto, han surgido diferentes enfoques en cuanto a cómo se modelan las ofertas de los generadores. Por ejemplo, Klemperer y Meyer (1989) presentan un modelo donde los generadores ofertan una cantidad y un precio, para formar una función de oferta continua. Von der Fehr y Harbord (1993) adoptan una idea similar, pero con la diferencia que las ofertas son discretas. Así mismo, surge también el debate entre precio uniforme y precio discriminatorio, aunque la mayoría de mercados mayoristas de electricidad utilizan un precio uniforme.

Lo importante de esta variedad de enfoques, es que el modelo de una subasta es específico de la que se está analizando, dado que existen distintas restricciones impuestas por el operador del sistema, quien es el encargado de recibir las ofertas de los generadores y balancear las mismas con la demanda existente, bajo reglas previamente establecidas.

El objetivo de este trabajo de investigación es modelar el mercado de oportunidad<sup>1</sup> de la electricidad en Guatemala, a través de una subasta multiunidad discreta de precio uniforme, donde la estrategia de cada generador corresponde a la oferta de cierta cantidad de energía y el precio mínimo por unidad que están dispuestos a recibir.

La distribución de esta investigación se da de la siguiente forma: en la parte 1, se presenta la revisión literaria, subdividida a su vez en, a) donde se incluye la información básica sobre el proceso de una subasta, enfocándose en la subasta multiunidad de bienes homogéneos; b) contiene información sobre el diseño de un mercado de electricidad y se revisa la literatura relacionada a este diseño y; c) cuenta con definiciones básicas relacionadas con un juego y se explica en qué consiste el equilibrio de Nash. Luego en la parte 2, se introduce al lector al funcionamiento del mercado de electricidad en Guatemala; esta sección se subdivide en las funciones del Administrador del Mercado Mayorista -AMM- y en el proceso de despacho de carga. En la parte 3 se presenta el modelo propuesto en el curso de este trabajo, para luego finalizar con las conclusiones.

<sup>1</sup> También conocido como mercado *spot*, es el lugar donde se realizan transacciones en tiempo real y el precio del mercado se fija cada hora en función de los costos de cada generador.

## 1. Revisión literaria

### a. Subastas

Una subasta, de acuerdo a una de sus propiedades principales, se puede definir como un mecanismo que balancea al mercado, donde se iguala oferta y demanda (Menezes y Monteiro, 2005). Una característica importante de este mecanismo es que es explícito y, por lo tanto, comprendido por todos los participantes de la subasta.

Klemperer (1999) clasifica en cuatro a los tipos básicos de subasta: subasta de oferta ascendente (subasta inglesa), subasta de oferta descendente (subasta holandesa), subasta en sobre cerrado de primer precio, y subasta en sobre cerrado de segundo precio (subasta de Vickrey).

Por otro lado, Menezes y Monteiro (2005) indican que la clasificación dependerá de distintos criterios; mencionan que una clasificación se puede dar diferenciando entre subastas abiertas y de sobre cerrado, también clasifican entre subasta de un solo objeto o de múltiples objetos<sup>2</sup>. Dada la naturaleza de los mercados de electricidad, esta investigación se centrará en este último tipo de subastas<sup>3</sup>.

Una característica de las subastas multiunidad con objetos homogéneos es que, cada comprador<sup>4</sup> envía una o varias ofertas -dependiendo de las reglas de la subasta- en donde especifica la cantidad de unidades que requiere y el precio que desea pagar por unidad.

En el proceso, el subastador posee una cantidad de objetos a subastar, y recibe las ofertas de los participantes; la distribución de unidades disponibles dentro de los compradores dependerá del precio que estos hayan indicado en su oferta; el subastador asignará las unidades tomando en cuenta siempre el precio mayor, en donde el precio resultante será el último precio más alto recibido hasta que las cantidades demandadas por los compradores y la oferta disponible se igualen.

Con posterioridad, los compradores que fueron convocados pagarán al subastador, dependiendo de, si se trata de una subasta con precio uniforme, en donde el precio ofrecido más alto es el que pagarán todos los participantes por la cantidad de objetos especificados en su oferta o, por precio discriminatorio, en donde cada comprador paga el precio que ofreció por la cantidad de unidades que demandó.

Estas subastas generalmente son en sobre cerrado, es decir, que el resultado se conocerá al terminar el tiempo estipulado por el subastador, dentro del cual se pueden enviar las ofertas.

<sup>2</sup> Los objetos subastados pueden ser homogéneos o heterogéneos.

<sup>3</sup> Porque las transacciones de electricidad se hacen a través de potencia o energía, los cuales se toman como un bien homogéneo y divisible, es apropiado enfocarse en las subastas multiunidad de bien homogéneo.

<sup>4</sup> La descripción del proceso de subasta se dará en la terminología general de subastas, en las secciones subsiguientes se contextualizará al mercado eléctrico.

### b. Diseñando una subasta en el mercado de electricidad

Diseñar adecuadamente una subasta no implica que este diseño se ajuste a todas las subastas, dado que -el diseño- debe ser sensible a los detalles del contexto (Klemperer, 2002).

Los principales factores a tomar en cuenta al momento de diseñar una subasta son los siguientes:

- Precio uniforme o precio discriminatorio
- Restricciones impuestas por el operador del sistema
- Simetría

Estos factores influirán en el comportamiento de los generadores y, por lo tanto, afectarán la estrategia que utilicen para realizar sus ofertas.

Como se ha mencionado brevemente en la introducción, diferentes autores han tomado distintos enfoques al modelar los mercados eléctricos. Klemperer y Meyer (1989) introducen el equilibrio de funciones de oferta (SFE<sup>5</sup>) para modelar un oligopolio con demanda incierta, cada firma utiliza como estrategia una función de oferta donde indica la cantidad de bienes y el precio a ofrecer y, se asume que las firmas son simétricas. Este modelo ha sido influyente en el análisis de los mercados de electricidad, utilizado entre otros por Baldick, Grant y Kahn (2004), Green y Newbery (1992) y Hölmberg (2005) quien adapta el SFE a precios discriminatorios.

Otro enfoque que se maneja, es el de las subastas multiunidad discretas, utilizadas por primera vez en el mercado eléctrico mayorista por von der Fehr y Harbord (1993) quienes lo aplican a Inglaterra y Gales, donde asumen una demanda aleatoria y firmas simétricas; Hortacsu y Puller (2008) también utilizan un enfoque multiunidad discreto para caracterizar un equilibrio, en donde hacen uso de datos detallados de las firmas del mercado *spot* de Texas, comparando los resultados realizados con los resultados teóricos esperados.

En cuanto a la eficiencia entre precio uniforme y precio discriminatorio, Cramton et al. (2001) están a favor de la subasta con precio uniforme, indican que la introducción de una subasta por precio discriminatorio solo crearía ineficiencias en el despacho de energía, impondría nuevos costos a los generadores y debilitaría la competencia; Fabra, von der Fehr y Harbord (2006) para un modelo multiunidad discreto con firmas simétricas, comparan una subasta de precio uniforme contra una subasta de precio discriminatorio en un mercado de electricidad y encuentran resultados ambiguos en cuanto al bienestar total. Mount (1999) indica que una subasta con precio uniforme solo exacerba la volatilidad de los precios y, por lo tanto, propone la adopción de una subasta con precio discriminatorio. Hudson (2000) debate que, ante períodos

<sup>5</sup> Por sus siglas en inglés *Supply Function Equilibrium*.

de alta demanda, las subastas con precio uniforme permiten el ejercicio de poder de mercado, en donde las firmas pueden influir en el precio final, mientras que, en una subasta con precio discriminatorio, este poder de mercado se ve reducido.

En relación a la simetría, Anderson y Hu (2008) utilizan el SFE en donde relajan el supuesto de simetría y en 2012 permiten que las firmas cuenten con contratos *forward*. Crawford, Crespo y Tauchen (2007) modelan el mercado de Inglaterra y Gales para competidores asimétricos utilizando un modelo de subasta multiunidad discreta. García-Díaz y Marín (2003) modelan el mercado eléctrico español, también de manera discreta, para una demanda determinista.

### C. Teoría de juegos: juego, estrategias y equilibrio de Nash

Un juego es la descripción formal de una situación estratégica (Turocy y von Stengel, 2001), incluye, como mínimo, un conjunto de jugadores, un conjunto de estrategias y un conjunto de pagos.

Las estrategias constituyen las distintas acciones que pueden tomar cada uno de los participantes del juego. Una estrategia es óptima, si es la mejor respuesta a las estrategias de los demás competidores y, como resultado, se obtiene el pago más alto, comparado con el pago de haberse desviado de esta.

El equilibrio de Nash corresponde a la lista de estrategias de cada jugador, las cuales tienen la propiedad de que ningún participante, de manera unilateral, pueda mejorar su pago al desviarse de su estrategia, es decir que, las estrategias utilizadas son óptimas, puesto que resultan en el pago máximo.

## 2. Mercado eléctrico en Guatemala

La Ley General de Electricidad fue promulgada en 1996 con el objetivo de eliminar el monopolio de generación, transmisión y distribución que mantenía el Instituto Nacional de Electrificación -INDE- y, por lo tanto, solucionar la deficiencia del sector en cuanto a la incapacidad de satisfacer la demanda haciendo crecer la oferta.

A partir de esta ley, el Ministerio de Energía y Minas -MEM- se constituyó como encargado de formular y coordinar las políticas relativas al sector eléctrico; se creó también, la Comisión Nacional de Energía Eléctrica -CNEE- como el órgano técnico del ministerio, con independencia funcional para ejercer sus funciones.

También se dio vida jurídica al Administrador del Mercado Mayorista -AMM- como el encargado de la coordinación del despacho y programaciones de la operación.

La Ley General de Electricidad, define como mercado mayorista, al conjunto de operaciones de compra y venta de bloques de potencia y energía que se efectúan a corto y a largo plazo entre agentes del mercado; así mismo identifica seis diferentes tipos de agentes<sup>6</sup>: generadores, comercializadores, distribuidores, importadores, exportadores y transportistas, quienes, para ser considerados como tales, deben superar un límite establecido según el Acuerdo Ministerial 195-2013:

- Generadores: tener una potencia máxima mayor a 5MW. (no se aplica a los generadores renovables)
- Comercializadores, importadores y exportadores: comprar o vender bloques de energía asociados a una oferta firme eficiente, o demanda firme, de por lo menos 5MW.
- Distribuidores: tener un mínimo de quince mil usuarios.
  - Distribuidores municipales solamente deberán contar con autorización otorgada por el Ministerio de Energía y Minas.
  - Distribuidores privados: tener una demanda de por lo menos 100KW.
- Transportistas: tener capacidad de transporte mínima de 10 MW.

El reglamento de la Ley General de Electricidad, también reconoce al "gran usuario"<sup>7</sup> como aquel consumidor de energía cuya demanda de potencia excede 10 KW.

El reglamento del AMM, establece que las operaciones de compra y venta del mercado mayorista se pueden realizar a través de tres tipos de mercado<sup>8</sup>:

<sup>6</sup> También se les conoce como participantes.

<sup>7</sup> *ídem*.

<sup>8</sup> Artículo 4 del Reglamento del Administrador del Mercado Mayorista -RAMM-.

- Mercado de oportunidad o mercado *spot*: donde se realizan transacciones de oportunidad de la energía eléctrica, a un precio establecido en forma horaria, el cual está calculado con base en el costo marginal de corto plazo, que es resultado del despacho de la oferta disponible.

La energía que se vende y compra en este mercado corresponde a los excedentes y faltantes que los participantes del mercado posean, como resultado de su generación o demanda y de los contratos realizados.

- Mercado a término: en el que se celebran contratos entre agentes o grandes usuarios, con plazos, cantidades y precios pactados por las partes; dichas condiciones se pactarán libremente.
- Mercado de transacciones de desvíos de potencia diarios y mensuales: donde las transacciones diarias se liquidan, al precio de referencia de la potencia, las diferencias entre potencia disponible y potencia firme de los participantes productores<sup>9</sup>; en las transacciones mensuales, se liquidan las diferencias entre demanda firme efectiva, y la demanda firme contratada de cada participante consumidor<sup>10</sup> durante el año estacional<sup>11</sup> correspondiente.

a. **Administrador del Mercado Mayorista –AMM- y su coordinación en el despacho de carga**

Dentro de las funciones del AMM, está realizar el despacho<sup>12</sup> y la programación de la operación, la cual se realiza de forma anual (año estacional), mensual, semanal y diaria; en donde se presenta la capacidad de cada generador, sus costos variables de generación, programas de mantenimiento de unidades generadoras de energía y de transporte, demanda proyectada y toda la información que, a criterio del AMM, pudiese afectar el buen funcionamiento del mercado mayorista.

La información contenida en las programaciones será brindada por los participantes del mercado mayorista, la cual estará sujeta a la validación por parte del AMM quien, de encontrar alguna inconsistencia, requerirá la justificación del participante o le sugerirá las modificaciones pertinentes. Si no se llegase a un acuerdo el AMM publicará la información bajo la responsabilidad del participante.

<sup>9</sup> Según el RAMM, se consideran participantes productores a los generadores, comercializadores e importadores.

<sup>10</sup> Según el RAMM, son participantes consumidores los distribuidores, grandes usuarios, comercializadores y exportadores.

<sup>11</sup> El año estacional, de acuerdo al RAMM es el período de doce meses que inicia el 1 mayo y termina el 30 de abril del siguiente año.

<sup>12</sup> Se refiere al despacho económico de carga que, según el RAMM, es el despacho de las unidades de generación optimizando al mínimo costo, para garantizar el abastecimiento de la demanda del Sistema Nacional Interconectado.

Para la programación de largo plazo, el AMM mandará a los participantes, a más tardar, dos meses antes del inicio del año estacional, una programación provisoria, la cual estará sujeta a revisión por parte de los participantes, quienes tienen un plazo de 20 días después de recibida la información para realizar cualquier tipo de observación; luego el AMM enviará a los participantes la programación definitiva correspondiente al siguiente año estacional.

Con respecto a la programación semanal, el AMM enviará a los participantes del mercado, el viernes a las tres de la tarde, las proyecciones correspondientes a la siguiente semana, siempre con la información suministrada por dichos participantes.

Para el despacho diario, se les informará a los participantes, a través de la página del AMM, la generación que no resultó despachada en el predespacho nacional y que, por lo tanto, estará disponible para exportar al Mercado Eléctrico Regional -MER-.

#### **b. Despacho de generación**

Según la norma de coordinación número uno, donde se establece la coordinación del despacho de carga, el objetivo principal del despacho de generación es balancear la generación con la demanda, manteniendo un nivel de reserva aceptable, todo esto a un mínimo costo.

El AMM para decidir qué unidades despachar, tomará en cuenta el despacho diario que ha sido programado, la disponibilidad de cada unidad de generación, los costos variables de generación, la energía comprometida en contratos y las reservas necesarias para la operación -toda esta información ha sido proporcionada por los participantes y validada por el AMM-.

Dado que se desea minimizar el costo total de operación, el AMM cuenta con una "lista de mérito", utilizada para despachar a las unidades de generación que se requirieran conforme a la demanda. En la lista de mérito se da prioridad a las unidades generadoras renovables y, luego, a las unidades generadoras térmicas, convocando en función del costo variable de generación que posean -del menor costo variable al mayor- hasta cumplir con la demanda.

El precio de oportunidad es establecido por la unidad generadora con mayor costo variable que generó por los últimos 15 minutos de la hora en la que se está determinando el precio de oportunidad. A esta unidad se le conoce como unidad generadora marginal.

### 3. Modelo

El mercado mayorista se modelará a partir de un juego correspondiente a una subasta multiunidad discreta y de precio uniforme; dado que, por la forma en que se ingresan las ofertas de cada generador, es más apropiado si se utiliza una modelación discreta en lugar de una continua (Fabra, von de Fehr y Harbord, 2002).

El proceso de vaciado del mercado se da de la siguiente forma:

- La demanda es pronosticada por el AMM para el día siguiente.
- Cada generador envía al AMM sus ofertas correspondientes para cada una de las 24 horas del día siguiente.
- El AMM utiliza estas ofertas para formar la curva de oferta del mercado, y selecciona a las unidades para minimizar el costo de operación total.
- La intersección entre el precio ofertado por el generador marginal y la demanda realizada determina el precio marginal del sistema -PMS-, pagado a todos los generadores convocados en esa hora.

El modelo que se propone se basa en una modificación y combinación de Crawford, Crespo y Tauchen (2007) y García-Díaz y Marín (2003).

Los supuestos que se manejan en el modelo son:

- S1: asimetría en los generadores<sup>13</sup>
- S2: demanda cuenta con una parte determinista y una estocástica<sup>14</sup>.
- S3: existe información completa<sup>15</sup>.
- S4: los generadores no ofertan por debajo de su costo marginal.
- S5: solo se permite una oferta por hora por generador.

Para el desarrollo del modelo, se describe el juego; se presentan las definiciones necesarias, seguidas de una proposición y de un lema con sus pruebas y con sus explicaciones correspondientes y, finalmente, el teorema en donde se demuestra que existe un equilibrio de Nash.

El juego se describe a continuación.

<sup>13</sup> Tanto los costos como la capacidad de generación varían entre cada firma.

<sup>14</sup> La parte determinista está dada por la proyección que brinda el AMM, la cual funciona con respecto al precio que se maneja en el mercado, y la parte estocástica corresponde a cambios en el clima o cualquier otra falla no prevista.

<sup>15</sup> El AMM envía las proyecciones de la demanda a todos los participantes del mercado, y tanto los precios del combustible utilizado en la generación, como los de la proyección del clima están disponibles al público en general.

Para cada una de las 24 horas del día existe una demanda, la cual se debe cubrir con la cantidad de energía disponible<sup>16</sup> con la que cuentan los generadores.

Cada generador tiene la posibilidad de realizar una oferta por hora, la cual está compuesta por una cantidad de energía y por un precio mínimo por unidad de energía que este está dispuesto a recibir. Esta oferta será la estrategia que cada generador adopte.

Para encontrar el precio de equilibrio, el AMM se encarga de balancear, al mínimo costo, la oferta y la demanda. Para esto, irá convocando a aquellos generadores que hayan presentado una estrategia con el menor precio, a manera de cumplir con la cantidad demandada y, el precio resultante, corresponderá a la estrategia del generador que contribuyó a que el mercado se vaciara<sup>17</sup>.

### Definición 1. Juego

$\Gamma_t = \langle I, P, U, \Pi, D \rangle$  es el juego correspondiente a la hora  $t, t=1, \dots, 24$ .

Donde,

$I_t = \{1, \dots, i, \dots, n\}$  es el conjunto de generadores  $i$  en la hora  $t$ .

$P_t = [O, \bar{P}]$  es el rango dentro del cual puede tomar valor el precio<sup>18</sup> en la hora  $t$ .

$U_t = \{U_{1t}, \dots, U_{it}, \dots, U_{nt}\}$  es el conjunto de generación de energía disponible en la hora  $t$ .

$Y U_{it} : [q_{it}, \bar{q}_{it}]$  representa la generación de energía disponible para cada generador  $i$ .

$\pi_{it}(\eta_{it}, \eta_{-it})$  es la ganancia correspondiente a cada firma  $i$ , dado el conjunto de  $\eta_t = \{\eta_{1t}, \dots, \eta_{it}, \dots, \eta_{nt}\}$  estrategias realizadas en  $t$ .

$D_t(\rho, \varepsilon) = D_t(\rho) + \varepsilon_t$  es la demanda total en la hora  $t$ . El shock  $\varepsilon = [\underline{\varepsilon}, \bar{\varepsilon}]$  tiene una función de distribución acumulada  $F(\varepsilon)$ <sup>19</sup>.

### Definición 2. Estrategia

La estrategia de oferta  $\eta_i$  de cada generador es  $\eta_i(q_{it}) : [q_{it}, \bar{q}_{it}] [O, \bar{P}]$ , donde  $q_{it}$  es la capacidad disponible mínima dado los contratos a término y  $\bar{q}_{it}$  es la capacidad máxima de generación de  $i$  a la hora  $t$ .

<sup>16</sup> Para cada firma, se entiende por energía disponible a la energía que resulta de la diferencia entre la capacidad máxima de generación y aquella comprometida en los contratos a término.

<sup>17</sup> En el Anexo A1 se presenta el gráfico correspondiente.

<sup>18</sup> Precio límite corresponde a la situación en la que, observado, el AMM tuviera que intervenir en el mercado.

<sup>19</sup> Las estrategias de los generadores son independientes de este shock.

Para cada generador  $i$ , los costos están denotados por  $c_{it}(q_{it})$  los cuales ya incluyen el costo de arranque y se asumen constantes en la hora en la cual se está dando el juego.

### Definición 3. Máxima generación dado costo marginal y precio

La máxima cantidad de energía que una firma  $i$  puede generar, tal que su costo marginal sea menor que el precio del mercado, se define como  $M_{it}(p) = \max \{ q_{it} \in U_{it} : c_{it}(q_{it}) \leq p \}$ .

### Definición 4. Generador marginal-fijador de precio y tomadores de precio

Dadas las estrategias  $(\eta_{it}, \eta(-_{it}))$  la demanda es tal que  $D_t(p, \epsilon) = \sum_i q_{it}$  y el precio  $P^*$  corresponde al PMS, un generador será marginal y fijador de precio si su estrategia es  $\eta_{it}(q_{it}) = P^*$ , donde  $q_{it}$  será la cantidad marginal que llene la demanda y, por lo tanto, los demás generadores  $j \neq i$  serán tomadores de precio<sup>20</sup>.

### Proposición 1.

La estrategia de todos los generadores que no son marginales es tal que  $\eta_{jt}(q_{jt}) = c_{jt}(q_{jt}) \forall j \neq i$ ,  $i$  es marginal.

*Prueba.*

*Asumir que existe un generador que ofrece un precio mayor a su costo marginal  $\eta_{kt}(q_{kt}) = c_k(q_{kt}) + \omega$ ,  $\omega > 0$  y suficientemente pequeño<sup>21</sup>, y todos los demás generadores ofrecen su costo marginal. Entonces dada la naturaleza del despacho de carga, y asumiendo que  $c_{1t} < \dots < c_{kt} < \dots < c_{nt}$ , entonces el generador  $k$  no será convocado cuando le corresponda; sabiendo que no es marginal, y que, por lo tanto, no podrá fijar el precio del mercado, no es óptimo este desvío de su estrategia.*

*Además, como los generadores son individuos racionales, querrán optimizar sus ganancias, lo que resulta en ofrecer toda la energía disponible tal que su costo marginal sea menor o igual al precio resultante en el proceso de balance del mercado.*

<sup>20</sup> Esto es congruente con una subasta de precio uniforme.

<sup>21</sup> Dado que el AMM cuenta con los costos de generación de cada competidor, una estrategia donde se ofrezca un precio que esté muy por encima de su costo, llamaría la atención del AMM, quien podría sancionar al generador en cuestión (Ley General de Electricidad, Título V).

Esta proposición implica que, para todo generador que no sea marginal -la cantidad de energía que oferte no equilibra al mercado y, por lo tanto, no puede ser fijador de precio- su estrategia óptima será ofrecer su costo marginal, puesto que, de ofrecer un precio por encima de su costo marginal, no obtendría ninguna ganancia mayor, y solo implicaría que no fuera convocado en el orden que le corresponde; y la cantidad que utilice en su estrategia será la máxima cantidad de energía, tal que, su costo marginal sea menor o igual al precio de mercado hasta el momento en el que está siendo convocado; esto es directo porque, todo generador como individuo racional, tiene como objetivo maximizar sus ganancias y, dada la naturaleza de los mercados eléctricos<sup>22</sup>, no tiene sentido contar con generación ociosa.

**Lema 1.**

Si el generador  $i$  es marginal, un generador  $j \neq i$  con  $q_{jt} = M_{jt}(P) \forall q_{jt} \in U_{jt}$  no puede ser marginal.

*Prueba.*

Se asume que el generador  $i$  es marginal, entonces su estrategia es tal que  $\eta_{jt}(q_{jt}) = P^*$ . Suponer que existe un generador  $j \neq i$ , quien cuenta con  $\hat{q}_{jt} > q_{jt}$  donde  $c_{jt}(\hat{q}_{jt}) < P^*$ . El generador podrá entonces ofrecer una estrategia

$$\eta_{jt}(q_{jt}) = \begin{cases} P^* - \delta, & \hat{q}_{jt} \leq q_{jt} \\ P^{**}, & \hat{q}_{jt} > q_{jt} \end{cases}$$

Donde  $\delta > 0$  es suficientemente pequeño.

De tal manera que la cantidad de energía por la que el generador será convocado es

$$\hat{q}_{it} = \begin{cases} q_{it} - \hat{q}_{jt}, & \hat{q}_{jt} \leq q_{it} \\ 0, & \hat{q}_{jt} > q_{it} \end{cases}$$

Por lo tanto, si  $q_{it} - \hat{q}_{jt} \geq D(\rho, \epsilon)$ <sup>23</sup> el generador seguirá siendo marginal. Y en el caso que ya no sea convocado por el AMM y deje de ser marginal, el generador deberá contar con  $\hat{q}_{jt} > q_{jt} = M_{jt}(P)$ .

El Lema 1 indica que, si existe un generador marginal -la cantidad que ofrece es tal que llena la demanda y, por consiguiente, puede fijar el precio del mercado- ningún otro generador que, como estrategia utilice la cantidad máxima de energía, tal que su costo marginal sea menor que el precio, podrá ser marginal.

Se asume que existe un generador que cuenta con una cantidad ociosa disponible, y que su costo marginal es, menor que el precio de vaciado del mercado, por lo tanto, podrá desviarse en su estrategia:

<sup>22</sup> Una característica de los mercados eléctricos es la dificultad de almacenamiento de la energía y de la potencia.

<sup>23</sup>  $D(\rho, \epsilon) = D(\rho, \epsilon) - \sum_{(j \neq i)} q_{jt}$

- a. Ofrecer un precio menor que el precio fijado por el generador marginal, si la cantidad con la que cuenta, es menor o igual que la cantidad que está ofreciendo el generador marginal.
- b. Ofrecer un precio diferente, pero siempre menor al PMS, si su cantidad es mayor a la cantidad que ofrece el generador marginal.

Como resultado de este desvío, el generador marginal se verá afectado en la cantidad de energía por la que es convocado por el AMM:

- a. La cantidad por la que será convocado es la resta entre la cantidad que oferta y la cantidad ociosa del otro generador.
- b. No será convocado.

Si se dan las condiciones descritas en el inciso "a", el generador marginal permanecerá como tal, puesto que, la cantidad por la que será convocado es mayor o igual a su demanda residual,<sup>24</sup> lo que resulta en que aún pueda fijar el precio de equilibrio.

Si se dan las condiciones del inciso "b", se requeriría que el otro generador contase con una cantidad de energía ociosa, lo cual se contradice con lo que establece el lema, y, apoyándose en la proposición 1, esta estrategia no sería óptima, porque todo generador que no es marginal utiliza como estrategia óptima su máxima generación, tal que su costo marginal sea menor o igual al precio del mercado.

### Teorema 1. Equilibrio de Nash

En un juego  $\Gamma = \langle I, P, U, \Pi, D \rangle$  existe un equilibrio de Nash en el que el generador  $i$  es marginal, el PMS es  $P^*$  y las ganancias de los generadores están dadas por  $\pi_i(\eta_{it}, \eta_{-it}^-) \forall i \in I$ , donde  $\pi_i(\eta_{it}, \eta_{-it}^-) \geq \pi_i(\hat{\eta}_{it}, \eta_{-it}^-)$ .

*Prueba.*

*Se descartan todas aquellas estrategias que estén por debajo del costo marginal. Y apoyándose en la proposición 1, entonces la estrategia óptima para todos aquellos generadores que no sean marginales será su costo marginal.*

*Luego, utilizando el lema 1 donde el generador es marginal, asumiendo que la cantidad de energía por la que el generador es convocado es, y es el factor de pérdidas nodales<sup>25</sup> correspondiente a cada generador en función del nodo en el que esté operando, entonces su ganancia esperada será tal que*

$$E[\pi_i(\eta_{it}, \eta_{-it}^-)] = E[P^* \tau_i q_{it} - c_{it}(q_{it})] \geq E[\pi_i(\hat{\eta}_{it}, \eta_{-it}^-)] = E[P^* \tau_i (q_{it} - \hat{q}_{jt}) - c_{it}(q_{it} - \hat{q}_{jt})]$$

<sup>24</sup> Demanda residual es la demanda total menos las estrategias de los demás generadores.

<sup>25</sup> El factor de pérdidas nodales está en función de la relación entre el costo de transmisión del nodo específico donde opera el generador hacia el nodo central, y la demanda que se da en ese nodo. Referirse a la norma de coordinación n.º 7.

El equilibrio de Nash se da cuando las ganancias resultantes de las estrategias óptimas son mayores que las ganancias provenientes de cualquier desvío en las mismas.

Para la prueba, se descartan todas las estrategias que impliquen ofertar un precio menor al costo marginal. Por lo tanto, el único posible desvío en la estrategia es el que se puede dar si un generador no marginal contase con energía ociosa. El resultado de esto sería entonces, que el generador marginal fuese convocado en una menor cantidad de la que él ofertó, lo que produce, de manera directa, una ganancia menor o igual a la que tendría de no existir este desvío.

## Conclusiones

En el curso de este trabajo de investigación se ha presentado un modelo teórico correspondiente al mercado de oportunidad de la energía en Guatemala, en donde se utiliza un enfoque de subasta multiunidad discreta de precio uniforme, los generadores son asimétricos y por lo tanto sus estrategias dependerán de dichas asimetrías. Se encuentra la existencia de un equilibrio de Nash, en donde cada generador no marginal debe ofertar su costo, y al único que se le permite que pudiese adoptar una estrategia por encima de su costo es al generador marginal.

Comparando los resultados obtenidos con Crawford, Crespo y Tauchen (2007) como con García-Díaz y Marín (2003) ambos documentos encuentran la existencia de un equilibrio de Nash, sin embargo, la diferencia principal con ambos, es que solo lo caracterizan para un duopolio.

Un aspecto importante de las subastas con precio uniforme es que, los demás generadores no adoptan ningún comportamiento estratégico, pues como ya se demostró, es óptimo que su estrategia sea ofrecer su costo marginal, lo que conlleva a que todos estos generadores se aprovechan del precio fijado por el generador marginal.

Dado que, como se ha mencionado al inicio, el diseño de cada subasta depende de las condiciones específicas bajo las cuales funcione el mercado; de llegar a permitírsele a los generadores realizar más de una oferta por hora, el enfoque aquí utilizado debería adaptarse a este nuevo supuesto.

## Referencias

- Anderson, E., y Hu, X. (2008). Supply function equilibria with asymmetric firms. En *Operations research*. pp. 697-711.
- \_\_\_\_\_. (2012). Asymmetric supply function equilibria with forward contracts. En *Journal of optimization theory and applications*. pp. 198-224.
- Baldick, R., Grant, R., y Kahn, E. (2004). Theory and application of linear supply function equilibrium. En *Journal of regulatory economics*.
- Cramton, P., Kahn, A., Porter, R., y Tabors, R. (2001). Uniform pricing or pay-as-bid pricing: a dilemma for California and beyond. En *The electricity journal*. pp. 70-79.
- Crawford, G., Crespo, J., y Tauchen, H. (2007). Bidding asymmetries in multi-unit auctions: implications of bid function equilibria in the British spot market for electricity. En *International journal of industrial organization*. pp. 1233-1268.
- Fabra, N., von der Fehr, N.-H., y Harbord, D. (2006). Designing Electricity Auctions. En *The RAND Journal of Economics*.
- Gacía-Díaz, A., y Marín, P. (2003). Strategic bidding in electricity pools with short-lived bids: an application to the Spanish market. En *International Journal of industrial organization*. pp. 201-222.
- Green, R., y Newberry, D. (1992). Competition in the British electricity spot market. En *Journal of political economy*. pp. 929-953.
- Harbord, D., Fabra, N., y von der Fehr, N.-H. (2002). Modeling electricity auctions. En *The electricity journal*.
- Holmberg, P. (2005). *Comparing supply function equilibria of pay-as-bid and uniform-price auctions*. Uppsala Universitet: working paper.
- Hortacsu, A., y Puller, S. (2008). Understanding strategic bidding in multi-unit auctions: a case study of the Texas electricity spot market. En *RAND Journal of Economics*. pp. 86-114.
- Hudson, R. (2000). *Analysis of uniform and discriminatory price auctions in restructured electricity markets*. U.S. department of energy.
- Klemperer, P. (1999). Auction theory: a guide to the literature. *Journal of economic surveys*, 227-286.

\_\_\_\_\_. (2000). Why every economist should learn some auction theory.

\_\_\_\_\_. (2002). What really matters in auction design. *Journal of Economic Perspectives*, 169-189.

Klemperer, P., y Meyer, M. (1989). Supply function equilibria in oligopoly under uncertainty. En *Econometrica*. pp. 1243-1277.

Ley General de Electricidad . (s.f.). Guatemala.

Menezes, F., y Monteiro, P. (2005). *An introduction to auction theory*. Oxford University Press.

Mount, T. D. (1999). Market power and price volatility in restructured markets for electricity. *Hawaii international conference on systems sciences*. Maui, Hawaii.

Norma de coordinación comercial n.º 1: coordinación de despacho de carga. (s.f.).

Norma de coordinación n.º 4: precio de oportunidad de la energía y sus reformas. (s.f.).

Reglamento de la Ley General de Electricidad y sus reformas. (s.f.).

Reglamento del Administrador del Mercado Mayorista y sus reformas. (s.f.).

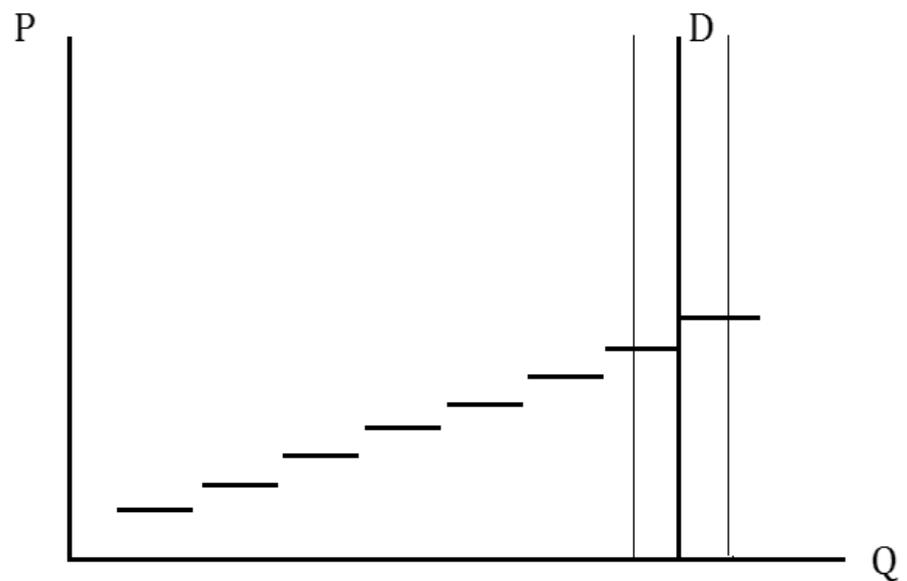
Turocy, T., y von Stengel, B. (2001). Game theory. En *Draft for the Encyclopedia of Information Systems*.

Von der Fehr, N.-H., y Harbord, D. (1993). Spot market competition in the UK electricity industry. En *The economic journal*. pp. 531-546.

## Anexos

### A1. Despacho de carga

Ilustración 1



Fuente: elaboración propia

Este gráfico representa cómo el AMM va convocando las ofertas de los generadores, a manera de llenar la demanda. Las líneas suaves representan la posible existencia de un *shock* estocástico, el cual podría alterar el pronóstico de la demanda.

En el momento en el que la cantidad ofrecida por un generador se intersecte con la curva de demanda, este se convierte en generador marginal y, por lo tanto, en fijador de precio.