



Un juego de inversión con información completa e incompleta aplicado al mercado eléctrico

An investment game with complete and incomplete information applied to the power market

Claudia María García Mazo*, Luis Francisco Ramírez Díaz,
Bernardo Antonio Monsalve Lozano

Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Colombia

Recibido el 3 de julio de 2020; aceptado el 3 de octubre de 2021
Disponible en Internet el: 10 de marzo de 2022

Resumen

El propósito de este trabajo es presentar dos juegos de inversión, con información completa e imperfecta en tres etapas, que permita la identificación del equilibrio de los jugadores en un mercado oligopólico. La reestructuración del mercado de energía trajo consigo la aparición de nuevos competidores convirtiendo al sector en un escenario con alto riesgo e incertidumbre, como consecuencia de la volatilidad de la demanda, competencia entre agentes, los precios de la electricidad y de los combustibles, dificultando de esta forma la toma de decisiones en relación con la inversión en la generación de la electricidad. Esta propuesta aplica como metodología la teoría de juegos que ayuda a la toma de decisiones en una estrategia de competencia imperfecta. Se concluye que cuando hay suficiente información tanto para el titular como el potencial entrante, la mejor opción es invertir, pero cuando la información es asimétrica, la mejor opción para el Potencial Entrante es invertir.

Código JEL: C72, C73, D43

Palabras clave: oligopolio; teoría de juegos; mercado de energía; hidráulica; eólica; cournot

* Autor para correspondencia

Correo electrónico: cgarcia@elpoli.edu.co (C. M. García Mazo).

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

<http://dx.doi.org/10.22201/fca.24488410e.2022.2978>

0186- 1042/© 2019 Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Contaduría y Administración. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

Abstract

This paper aims to present two investment games with complete and incomplete information in three stages that allow identifying equilibria games of the players in the oligopoly market. The restructuring of the power market brought with it new competitors' appearance to become a sector with high risk and uncertainty due to demand, electricity, oil price volatility, competence between firms, among others, thus making it difficult to make decisions regarding investment in electricity generation. This proposal applies the games theory methodology that helps making-decisions in an imperfect competence market. This study shows that when the firms have enough information, the best option for the incumbent and potential entrants firms is to invest. When the information is asymmetric, the best option for Entrants Potential firm is to invest.

JEL Code: C72, C73, D43

Keywords: oligopoly; game theory; power market; hydro-power; wind-power; cournot model

Introducción

A mediados de la década de los ochenta se inició la reestructuración de los mercados eléctricos. La liberación del sector se debió a deficiencias como: la incapacidad, por parte de las empresas estatales, de satisfacer la demanda de los usuarios, el incremento de los precios de electricidad, corrupción en algunas empresas estatales, desfase entre las tarifas y los costos verdaderos de generación, entre otras (Carvajal & Jiménez, 2012; Dubash, 2002). Con este nuevo modelo económico se buscaba mejorar la eficiencia económica y de suministro de energía.

Esta reestructuración se orienta a separar las actividades de generación, transmisión y distribución en aras de eliminar la estructura vertical de la industria eléctrica. La intención de esta reforma era atraer la inversión privada, aumentar la eficiencia del sector y el Estado se convierte en un ente regulador. Frente a esta realidad, el sector se convierte en un escenario con alto riesgo e incertidumbre, debido a la volatilidad de los precios, los cambios en la demanda, disponibilidad y precios de los combustibles, la entrada y salida de competidores, entre otros factores que dificultan la toma de decisiones con relación a la inversión.

Desde esta lógica se vienen desarrollando estudios que apuntan a crear metodologías que puedan ser utilizadas para la toma de decisiones en la expansión de los generadores, teniendo en cuenta el comportamiento estratégico de los agentes competidores, entre ellas está la Teoría de Juegos. Esta metodología trata de describir complejas situaciones estratégicas en un contexto simplificado. El conocimiento de las reacciones esperadas del contrincante puede mejorar la capacidad de la empresa para plantear una adecuada estrategia competitiva.

De acuerdo con los trabajos presentados para el análisis del sector eléctrico correspondiente a la estrategia competitiva entre agentes, se observa que los juegos no cooperativos y los modelos oligopólicos, especialmente el Cournot, son ampliamente utilizados para describir el funcionamiento de este tipo de mercado. También es importante mencionar que el conocimiento de la información puede afectar el valor del proyecto y si se habla del mercado de energía, existe la posibilidad de darse una mayor expansión del sector al aumentar el número de inversionistas y por consiguiente se puede brindar mayor seguridad al sistema.

Con base en lo anterior, se fija como objetivo de este trabajo, presentar dos juegos de inversión, con información completa e imperfecta en tres etapas, que permita identificar el equilibrio de los jugadores en un mercado oligopólico.

El contenido de esta propuesta está organizado en cuatro partes. La primera se inicia con la introducción, en la segunda se hace una descripción de la teoría de juegos en los mercados de electricidad. En la tercera parte, se describe el estado del arte de la teoría de juegos aplicados a los mercados de electricidad. En la cuarta sección se especifica el juego que se desea desarrollar con sus respectivos supuestos, este a su vez se divide en los dos juegos, Información perfecta e Información incompleta y en la última parte, se muestran las conclusiones.

Teoría de juegos en los mercados de electricidad

La electricidad es fundamental para el desarrollo industrial y económico de un país, si una región pretende alcanzar un crecimiento en sus niveles de producción debe enfrentar incrementos en su demanda de energía. Por tanto, los hacedores de política presentan el desafío de aumentar la capacidad instalada de generación de una manera acorde con las necesidades de la población, conciliando intereses de los agentes en los aspectos económico, legal, ambiental, social, entre otros.

Las actividades del sector eléctrico eran monopolios integrados de una manera vertical, mayormente con inversión pública (en algunos países eran de propiedad privada, con una regulación especial por parte del gobierno). La planeación y toma de decisiones eran centralizadas (García et al., 2010). Sin embargo, a partir de la década de los 80 se evidenciaron deficiencias como la incapacidad, por parte de las empresas monopólicas, de satisfacer la demanda de los usuarios, el incremento de los precios de electricidad debido a los costos crecientes causados por las ineficiencias en la gestión, corrupción en algunas empresas estatales, desfase entre las tarifas y los costos verdaderos de generación (básicamente por móviles políticos), entre otras (Carvajal & Jiménez, 2012; Dubash, 2002). Por esta razón, se vio la necesidad de liberalizar el mercado eléctrico, con el fin de mejorar la eficiencia económica y de suministro de energía.

La reestructuración del sector eléctrico involucró varias medidas, entre ellas la eliminación de la estructura vertical de la industria eléctrica, al separar las actividades de generación, transmisión y distribución, y la separación horizontal de estas actividades, con el fin de atraer la inversión privada y aumentar la eficiencia del sector, el papel del gobierno dejaría de ser actor en el sistema para pasar a regulador (Niknam et al., 2013, 2013; Pinto et al., 2015).

El nuevo modelo económico conllevó a la creación de un mercado competitivo, en que el Estado no solo asumía la expansión del sistema, sino que permitió la entrada de inversionistas privados para expandir la capacidad de generación, pero en escenarios de riesgo e incertidumbre debido a la volatilidad en los precios de la electricidad, evolución de la demanda, la disponibilidad y precios de los combustibles, la entrada y salida de competidores, entre otros, que dificultan la toma de decisiones con relación a la inversión (Mercure et al., 2019).

Autores como Hobbs (1995), Ahmad et al. (2016), señalan que algunas de las razones para el incremento en la complejidad del proceso de planificación con relación a la expansión del sistema eléctrico, son: la existencia de muchos agentes inversionistas para actuar en el sector eléctrico, el creciente número de opciones para la realización de las inversiones, gran incertidumbre asociada con el crecimiento del consumo, el aumento de la volatilidad del mercado de combustibles, el desarrollo tecnológico, la regulación del gobierno y, por último, la inclusión de nuevos objetivos, además de los costos (Pereira & Saraiva, 2013).

En los últimos años, se han presentado varios estudios (Fosso, et al., 1999; Phupha, et al., 2012; Rouhani et al., 2013; Zhang et al., 2013; Alizadeh & Jadid, 2015; Fitiwi et al., 2015; Gil et al., 2014; Maceira et al., 2015;), con el fin de desarrollar metodologías que puedan ser utilizadas para la toma de decisiones, con relación a la expansión de los generadores, entre ellas está la Teoría de Juegos.

La teoría de juegos es una herramienta que estudia el comportamiento estratégico de jugadores (racionales) que interactúan motivados por la maximización de la utilidad (Fischer, 2012; Smit & Trigeorgis, 2004). Esta herramienta trata de describir complejas situaciones estratégicas en un contexto simplificado. El conocimiento de la reacción esperada del rival puede mejorar la capacidad de la empresa para plantear una adecuada estrategia competitiva. La respuesta anticipada del competidor, es un elemento esencial en el diseño de una estrategia competitiva (Smit & Trigeorgis, 2004). La teoría de juegos se puede clasificar en juegos finitos y no infinitos, juegos de información completa (perfecta) y de información incompleta (imperfecta), estáticos y dinámicos.

Un juego se puede definir como, cualquier situación en la que los individuos deben tomar decisiones estratégicas y en la que el resultado final depende de lo que cada uno decida hacer. De acuerdo a la teoría de las categorías de Aristóteles, todo juego está compuesto por una serie de características, independientes de si estos son juegos de mesa, juegos de carta, videojuegos, juegos deportivos o de ocio.

Por otro lado, los supuestos de esta teoría son (i) las empresas son racionales, es decir, buscan la maximización de los beneficios, (ii) los directivos de las empresas utilizan todos los conocimientos que poseen, para formar sus expectativas de cómo sus competidores se comportarán en el mercado, es decir, aplican la racionalidad al proceso de razonamiento estratégico (Varian, 2010). En la figura 1 se puede apreciar dichas características.

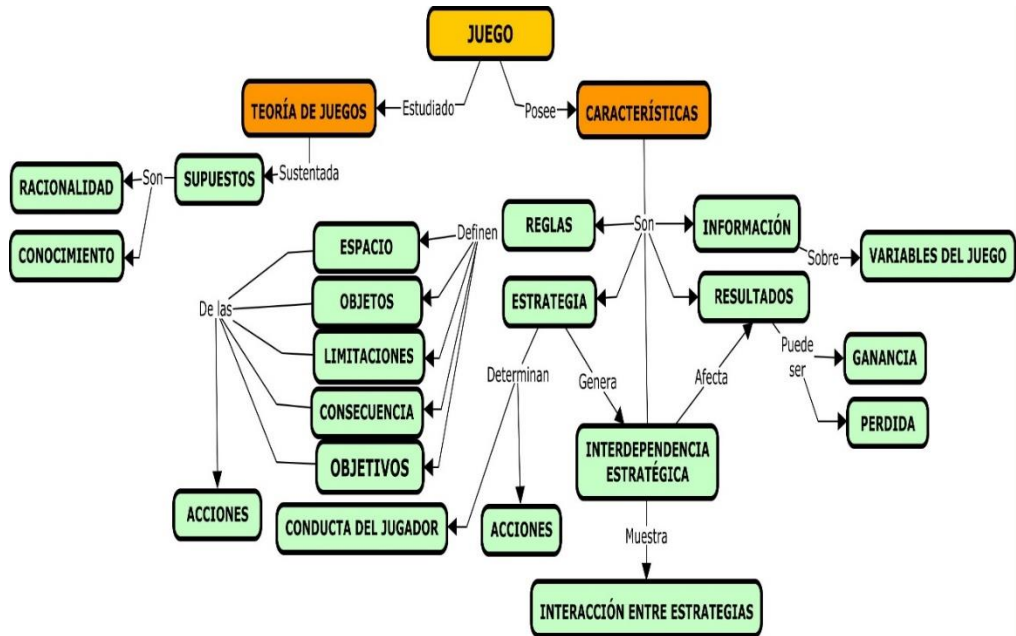


Figura 1. Característica del juego.
 Fuente: Elaboración propia a partir de (Waldman & Jensen, 2013).

En la teoría económica de los mercados, el “equilibrio” es un concepto que indica que los demandantes están satisfechos con lo que se ofrece en el mercado, dado el precio y la cantidad de equilibrio, ningún agente tiene incentivos para cambiar su comportamiento. En la teoría de juegos se construye una noción de equilibrio y existen varios caminos para formalizarlo. Inicialmente fue propuesto por Cournot en el siglo XIX, en el que plantea un “modelo competitivo de varias empresas que compiten por un mismo bien, y en el que cada una de ellas intenta determinar la cantidad óptima que deben producir para maximizar sus ganancias” (Pindyck & Rubinfeld, 2009, p. 516).

A principios de la década de los 50, John Nash utiliza las matemáticas para probar la existencia de equilibrio de una manera general, es en este momento donde se desarrolla el equilibrio de Nash, el cual se alcanza cuando ninguno de los jugadores o agentes de un juego, tienen incentivos en cambiar la decisión, pues si lo hacen pueden empeorar su bienestar. Este es un concepto utilizado con regularidad, en situaciones de competencias entre empresas (Varian, 2010).

De acuerdo Smit & Trigeorgis (2004), la teoría de juegos puede ser útil en el análisis de las decisiones estratégicas de inversión por varias razones. En primer lugar, puede ayudar a reducir un problema complejo de estrategia en una estructura analítica sencilla, que consta en diferentes dimensiones, identificación de los jugadores y estrategias, el conjunto de acciones e información disponible y la estructura de pago para el posible resultado. En segundo lugar, es una herramienta útil para la valoración de las decisiones estratégicas, dado que abarca un concepto de solución que puede ayudar en la comprensión o a predecir cómo se comportarán los competidores. Así mismo, proporciona estrategia de equilibrio y los valores de las decisiones estratégicas.

Por otra parte, los agentes deben tener claro cuál es la estructura del juego, para determinar las estrategias de los jugadores y la solución de este. Dixit & Nalebuff (1991) proponen los siguientes puntos que deben ser tenidos en cuenta para la resolver un juego:

- Encontrar las estrategias dominantes: inicialmente se debe identificar si un jugador tiene estrategias o un conjunto de acciones que superan la de todos los otros, independientemente de lo que el otro jugador hace. Si los agentes presentan estrategias dominantes, la solución del juego es menos complejo, hasta el punto en que se puede predecir el resultado del juego, porque es posible averiguar la estrategia óptima de cada jugador sin preocuparse por lo que hacen los demás (Pindyck & Rubinfeld, 2009).
- Eliminar la estrategia dominada: eliminar aquellas estrategias que sean inferiores, es decir, estén dominadas por otras, hasta que se halle una solución única, si no se llega a esta solución, al menos se ha simplificado el juego.
- Encontrar el equilibrio de Nash en estrategias puras: no todos los juegos pueden ser resueltos a través de la eliminación de las estrategias dominadas, por tal razón, se debe buscar aquellas estrategias de cada jugador que sean la mejor respuesta ante las estrategias seguidas por los otros agentes, en otras palabras, encontrar el equilibrio de Nash.
- Encontrar el equilibrio de Nash en estrategias mixtas: este tipo de estrategias incluye el azar. Un agente utiliza este tipo de estrategia cuando no quiere ser completamente predecible, lo que hace es asignar probabilidades a sus acciones.

- Inducción hacia atrás para resolver los juegos secuenciales: lo que se hace es analizar el juego desde el final hacia el principio, permitiendo identificar el equilibrio de Nash en estrategias puras.
- Encontrar un equilibrio perfecto en subjuegos: es utilizado para juegos dinámicos, el cual consiste en que un jugador se mueva antes que su competidor, y estos observan su decisión antes de jugar.

Smit & Trigeorgis (2004), a este conjunto de reglas, añaden otras más, el uso de las opciones reales en la metodología inducción hacia atrás para juegos secuenciales en condiciones de incertidumbre. En este caso la utilidad esperada, un concepto muy utilizado en la teoría de juegos, es reemplazado por el valor de la opción. Este nuevo enfoque permite valorar las estrategias completas en un contexto competitivo, de una manera que sea consistente con la economía moderna y la teoría de las finanzas.

Estado del arte de la teoría de juegos en los mercados de electricidad

Como se ha mencionado anteriormente, la Teoría de Juegos es una técnica útil para modelar la planificación de expansión de generación porque permite analizar las estrategias del comportamiento de estos agentes (Alishahi et al., 2011). Con la liberación se buscaba la creación de un mercado competitivo, sin embargo, la presencia de economías de escala y la capacidad cada vez mayor de las empresas en soportar riesgos mediante la diversificación, por tanto la industria de la generación de energía suele organizarse como un mercado oligopólico, con algunos agentes tomando posiciones dominantes (Lopez et al., 2017). Estas posiciones dominantes se logran mediante el ejercicio de poder de mercado; obteniendo como resultado el aumento de sus beneficios por encima de los niveles competitivos, o mediante la elevación de barreras de entrada (inversiones con el fin de limitar o impedir la entrada de nuevos participantes al mercado). Para ello, los agentes participantes implementan diversas estrategias o juegos, haciendo que el modelado del comportamiento de los mercados oligopólicos sea mucho más complejo de describir y anticipar (Lopez et al., 2017).

Esta herramienta ha sido ampliamente utilizada en diferentes sectores económicos con un buen número en el mercado eléctrico. A continuación se van a presentar algunas propuestas orientadas a este mercado, con la finalidad de darle un sustento teórico al planteamiento de los juegos que se van a desarrollar:

Ferrero & Ramesh (1997) estudian el comportamiento competitivo de los generadores y las coaliciones eventuales que podrían ser formadas. Los autores utilizan la teoría de juegos para simular el proceso de toma de decisiones para definir los precios ofrecidos en un ambiente desregulado. De acuerdo con los resultados, los participantes tratan de maximizar sus beneficios cooperando en el mercado pool.

La noción de que la creciente competencia contribuirá a disminuir los costos de operación parece estar apoyada por los resultados obtenidos en el documento. Matemáticamente, aumentar la competencia hace que la coalición sea más atractiva para todos los participantes. Carpio & Pereira (2006) describen las estrategias competitivas de los subsistemas del sector eléctrico brasileño. El objetivo es presentar un modelo en el que la operación de cada subsistema se gestiona de forma independiente. Los procesos de toma de decisiones se describen a través de la teoría de juegos. Los jugadores o los operadores de cada subsistema, llevan a cabo sus estrategias basadas en las cantidades producidas resultando un equilibrio Nash-Cournot.

Shafie-khah et al. (2013) proponen un modelo de mercado energético virtual, para investigar el comportamiento de los jugadores en este mercado desde el punto de vista del regulador. Los resultados indican que es necesario simular el comportamiento estratégico y colusivo, antes de cualquier cambio en las reglas del mercado. Ossa (2012) analiza del comportamiento estratégico de los agentes generadores en el mercado eléctrico colombiano. El autor muestra las estrategias operativas y comerciales de los generadores en el mercado colombiano. La propuesta se realiza bajo un esquema analítico haciendo uso de algunas de las teorías de la estrategia. Una de las conclusiones de este trabajo es que las grandes empresas de generación se encuentran en una posible posición dominante para ejercer poder de mercado y por consiguiente el mercado es menos competitivo.

Ferrero & Ramesh (1997) abordan el problema de la información incompleta de cada generador al momento de fijar el precio al que venderán su producto. Los autores, modelan un juego no cooperativo con información incompleta y el problema es resuelto calculando el equilibrio Nash-Bayesiano. Yang et al. (2018) proponen un juego de información incompleta para la estrategia de precios entre varias firmas de electricidad. Los autores plantean un juego bayesiano por ser un método adecuado para modelar este tipo de juegos y consideran la participación de los consumidores para equilibrar el mercado eléctrico al modelar el costo de la empresa de electricidad. Entre los resultados de este trabajo están que el juego bayesiano puede mejorar significativamente las ganancias de las empresas, así mismo, este es adecuado para resolver el problema de información incompleta.

Wolfram (1999) formula un estudio empírico del poder de mercado en la industria de electricidad de Gran Bretaña. El autor evalúa la aplicabilidad de varios modelos oligopólicos, entre ellos está el modelo Cournot. Chuang et al. (2001) aplica un juego no cooperativo para la Planificación de la Expansión de Generación (GEP) en el sector eléctrico, utilizando el modelo Cournot. Los resultados apuntan a que se presentan una mayor expansión y fiabilidad del sistema cuando existen varios jugadores que un monopolista tradicional. Oliveira (2008) plantea un juego de inversión utilizando el modelo Cournot en el mercado de electricidad. El autor analiza como las expectativas sobre los costos marginales

de los competidores, el nivel de demanda y el comportamiento de los demás influyen en el valor de un proyecto.

Navidi & Bidgoli (2011) proponen un juego de información perfecta con dos empresas (Retail) que compiten por cantidad y desean decidir sobre la cantidad óptima de sus ofertas. Chuang et al. (2001) presentan una aplicación del juego no cooperativo para la Planificación de la Expansión de Generación (GEP) en el sector eléctrico. Los resultados apuntan a una mayor expansión de la industria y fiabilidad del sistema bajo la competencia a la Cournot que a una planificación centralizada. Ventosa et al. (2002) mencionan que los mercados eléctricos al abrirse a la libre competencia son pocos los participantes que lo integran, por lo que se ajustan a un modelo oligopólico. Los autores desarrollan dos modelos alternativos basados en la teoría de juegos para el problema de la planeación con relación a la expansión. Inicialmente, proponen dos juegos, Modelo Cournot y Stackelberg (existe un líder (empresa) que se anticipa a las reacciones de sus seguidores). El principal resultado es que la firma líder invierte más y obtiene mayores beneficios que la firma seguidora, tal como indica la teoría.

García et al. (2013) estudia el Poder de Mercado en Mercados Spot de generación eléctrica en el mercado colombiano. Los autores plantean un modelo exponencial para la función de oferta teniendo en cuenta variables como el clima, la regulación, los costos, etc. Luego utilizan la técnica convulsión (similar a un filtro de Kalman) y un modelo de Cournot, para estimar los efectos que pueden tener los agentes sobre el precio spot, comportándose de una manera estratégica vía cantidades y realizando transacciones tanto en la Bolsa, como en Contratos a largo plazo, para obtener un mayor beneficio. Venslauskas-Duarte & García (2014) utilizan el Precio Marginal del Sistema (PMS) para hallar las cantidades óptimas que deben ofertar las generadoras en el mercado spot y usan estas estimaciones para construir variables como el Índice de Demanda Residual y el Índice de Herfindahl e Hirschman. Los resultados de la propuesta muestran un mayor comportamiento estratégico de los generadores hidráulicos con relación a las térmicas, cuando se da una baja demanda, esto se debe a la capacidad de almacenamiento de las hidráulicas. En caso contrario, cuando la demanda es alta, las térmicas son más estratégicas, por la reducción de los recursos (agua) de la hidráulica.

Fabra & Toro (2005) analizan el desempeño de los precios del mercado eléctrico utilizando el modelo de Cournot. Los autores caracterizan las desviaciones óptimas de la empresa desde un acuerdo colusivo llegando a la conclusión que los generadores pueden haber obtenido un acuerdo tácito que distorsiona los resultados del mercado, en que la empresa con mayores niveles de producción pudo haber producido a precios por debajo del costo marginal. García & Arbelaez (2002) utilizan el Modelo de Cournot dinámico para evaluar los posibles impactos de fusiones en el Mercado Eléctrico Mayorista colombiano sobre el precio del mercado spot. Los autores muestran que se presenta un incremento en el precio marginal del sistema cuando se retiene la capacidad ofertada antes de la fusión. Por otro lado, al

incorporarse al modelo altos niveles de contratación ex ante, los precios posteriores a la fusión no aumentaron ni disminuyeron por debajo de los precios previos a la fusión. Franco-Arboleda (2012) analiza un modelo de mercado mayorista de energía de corto plazo mediante teoría de juegos, fundamentado en el modelo de mercado de Cournot y en la teoría de juegos, donde los participantes del juego son los agentes generadores.

Lise et al. (2006) desarrollan un modelo de teoría de juegos de cálculo estático para investigar los impactos del precio, la demanda y los diferentes tipos de emisiones contaminantes en el mercado competitivo. El modelo se estima empíricamente a ocho países del noroeste de Europa: Bélgica, Dinamarca, Finlandia, Francia, Alemania, Países Bajos, Noruega y Suecia. Los autores analizan el impacto de la competencia sobre el precio al por mayor de la electricidad, la demanda de electricidad, los beneficios de las empresas y los diferentes tipos de emisiones contaminantes a partir de dos tipos de competencia. Los resultados indican que los efectos de la liberalización dependen de la estructura de mercado resultante, pero que una reducción en el poder de mercado de los grandes productores puede ser beneficioso tanto para el consumidor (es decir, precios más bajos), como para el ambiente (menor de efecto invernadero).

Vega (2006) propone un modelo de inversión mediante un juego no cooperativo en un contexto estático y dinámico, con la finalidad de simular un sistema hidro-térmico basado en una Bolsa de Energía. Blyth et al. (2007) plantean un modelo basado en el análisis de la evolución de estructura del mercado tecnológico en el mercado eléctrico. Esto se hace a través del desarrollo de un juego de intercambio de planta de energía, que a través del aprendizaje computacional simula como los jugadores coordinan su comportamiento en la compra y venta de activos de generación de energía. Los autores modelan el mercado eléctrico a través de un juego a la Cournot t una de sus conclusiones es que una canasta diversificada conduce a una mayor competencia entre las generadoras y bajos precios.

Motalleb et al. (2018) aplican un juego teórico repetido para modelar la competencia entre agentes (oferentes de energía almacenada en celdas de almacenamiento electroquímicas) y dar respuesta a la demanda a un sistema con una creciente penetración de energía renovable. Los autores consideran dos tipos de juegos no cooperativos: un juego no regulado sin limitación en los poderes de transacción y el precio, y un juego de Stackelberg con un líder para controlar las transacciones entre los agentes y el precio (como un juego regulado). El juego de Stackelberg es relativamente realista y proporciona una posible alternativa adecuada a las actuales estructuras de mercado. Este modelo encuentra la estrategia de oferta óptima para cada firma en un juego con información incompleta. Los resultados mostraron que las ganancias de los jugadores disminuyeron en el juego regulado (Stackelberg) en comparación con la competencia no regulada. Abapour et al. (2020) consideran un juego no cooperativo con información incompleta para las estrategias de oferta, en respuesta a la demanda del mercado de electricidad. Este

juego es resuelto utilizando equilibrio de Nash. Los autores demuestran que al implementar este método la utilidad del operador aumenta un siete (7) por ciento.

Askari et al. (2015) plantean un modelo para simular el mercado energético reestructurado. En este estudio se consideraron la demanda, el precio del combustible, las incertidumbres del viento y el comportamiento estratégico de los inversionistas mediante la teoría de juegos. En este caso se propone un modelo Cournot para determinar el equilibrio de Nash para cada estado de programación estocástica. Además, en el modelo se consideraron los impactos de la Feed in Tariff (FIT) fija y variable como dos políticas regulatorias para las unidades de generación eólica. Los resultados describen el efecto de FIT sobre el beneficio promedio de cada inversionista en cada temporada. Además, en este estudio mostró el efecto incremental del precio límite sobre la ganancia promedio total del mercado de energía reestructurado. Este modelo podría ser muy útil para la planificación de la expansión de la generación.

De Frutos-Cachorro et al. (2020) diseñan un modelo estructural usando enfoques de optimización y teoría de juegos para analizar la incertidumbre sobre la eliminación de la energía nuclear en el sistema energético en Bélgica y como afecta las decisiones de capacidad de inversión de los proveedores de electricidad belgas en función del tipo de estructura de mercado: Oligopolio (simplificado a un duopolio para este caso), Monopolio y Competencia Perfecta. Los autores muestran que los incrementos en nueva capacidad de generación eléctrica se dan cuando se presenta una reducción en la energía nuclear y mayores niveles de competencia en el mercado.

Wang et al. (2020) proponen un modelo de planeación de generación multinivel (alto, medio y bajo) en el mercado eléctrico chino. El nivel superior es mostrado como un problema de equilibrio del juego no cooperativo de la decisión de inversión de generación. El nivel medio representa el problema de maximización de beneficios de la inversión de generación. Los autores utilizan la programación lineal para resolverlo como un modelo de equilibrio de mercado con múltiples etapas basado en escenarios. El nivel inferior, teniendo en cuenta la fluctuación de la carga del sistema, revelan el problema de equilibrio de mercado en múltiples escenarios y períodos. Dada la complejidad del modelo, este trabajo propone un algoritmo genético anidado para resolverlo. Los resultados muestran que cuando hay una reducción en la competencia, los agentes pueden reducir la inversión para crear una situación de escasez de oferta y obtener altas ganancias al subir los precios de mercado. Por otro lado, los reguladores deben hacer todo lo posible para eliminar las barreras a la inversión en generación y atraer a más inversionistas para ingresar al mercado.

Andoni et al. (2021) plantean un modelo de teoría de juegos para estudiar las interacciones estratégicas entre los jugadores que maximizan las ganancias que invierten en redes eléctricas, generación renovable y capacidad de almacenamiento. Los autores modelan el problema de determinar la capacidad que deberá construir cada jugador, para esto se plantea un juego Stackelberg-Cournot no cooperativo entre

un jugador dominante (líder) que invierte en capacidad de generación renovable y redes de transmisión y los inversionistas locales, agentes seguidores, que reaccionan a la instalación de la línea de transmisión aumentando su propia capacidad. Esta metodología proporciona un mecanismo realista para analizar la toma de decisiones de los inversionistas e investigar las tarifas viables que fomenten la inversión en redes de electricidad para la energía renovable. Esta propuesta la aplican a un proyecto de mejoramiento de la red eléctrica en el Reino Unido. Aryani et al. (2021) presentan una herramienta regulatoria para la coordinación de inversiones en generación basada en riesgo en capacidades convencionales y renovables, considerando los objetivos del regulador para la adecuación y las condiciones ambientales. El modelo lo está dado en dos niveles. En el primer nivel, el regulador diseña incentivos a la inversión para la generación convencional y renovable teniendo en cuenta la respuesta de los inversionistas a las decisiones regulatorias. En el segundo nivel, se considera un modelo de teoría de juegos para capturar las interacciones competitivas entre los generadores adversos al riesgo. La principal ventaja del modelo propuesto es que tanto los objetivos del regulador para las consideraciones tecno-ambientales como las preocupaciones de los generadores sobre los riesgos de inversión se contemplan al mismo tiempo de una manera económica.

En la tabla 1 se resumen algunos de los principales aportes en la teoría de juegos, planteada anteriormente.

Tabla 1
Estudios que utilizan la metodología de Teoría de Juegos en el sector de generación a nivel internacional

Autor(es)	Año	Objetivo	Modelo	Aporte
Ferrero et al.	1997	Estudiar el comportamiento competitivo de los generadores y las coaliciones eventuales que se forman.	Teoría de Juegos	Los participantes tratan de maximizar sus beneficios cooperando en el mercado pool para obtener máximos beneficios.
Ferrero et al.	1998	Abordar el problema de la información incompleta de cada generador al momento de fijar el precio al que venderán su producto.	Juego no cooperativo con información incompleta	La competencia es modelada como un juego no cooperativo con información incompleta y el problema es resuelto calculando el equilibrio Nash-Bayesiano.
Wolfram	1999	Presentar un estudio empírico del poder de mercado en la industria de electricidad de Gran Bretaña.	Modelo Cournot	El autor evalúa la aplicabilidad de varios modelos oligopólicos, entre ellos está el modelo Cournot.

Chuang et al.	2001	Presentar una aplicación del juego no cooperativo para la Planificación de la Expansión de Generación en el sector eléctrico.	Juego no cooperativo- modelo Cournot	Los resultados apuntan a una mayor expansión y fiabilidad del sistema cuando existen varios jugadores que un monopolista tradicional.
Ventosa et al.	2002	Desarrollar modelos para el problema de la planeación con relación a la expansión.	Un juego no cooperativo: modelos Cournot y Stackelberg	El principal resultado obtenido es que la firma líder en el juego a la Stackelberg invierte más y obtiene mayores beneficios que en el juego Cournot, tal como indica la teoría.
García & Arbeláez	2002	Evaluar los posibles impactos de fusiones en el Mercado Eléctrico Mayorista de Colombia, sobre el precio del mercado spot.	Modelo de Cournot	Los autores muestran que un incremento en el Precio Marginal del Sistema cuando se retiene la capacidad ofertada antes de la fusión.
Fabra & Toro	2005	Analizar el desempeño de los precios del mercado eléctrico utilizando el modelo de Cournot.	Modelo de Cournot.	Los generadores pueden llegar a un acuerdo tácito que distorsiona los resultados del mercado, en el cual la empresa con mayores niveles de producción puede haber producido a precios por debajo del costo marginal.
Lise et al.	2006	Investigar los impactos del precio, la demanda y los diferentes tipos de emisiones contaminantes en el mercado competitivo.	Teoría de juegos estático	Los resultados indican que los efectos de la liberalización dependen de la estructura de mercado resultante, pero una reducción en el poder de mercado de los grandes productores puede ser beneficiosos tanto para el consumidor (es decir, precios más bajos) y el medio ambiente (menor de efecto invernadero).
Vega	2006	Proponer un juego no cooperativo en un contexto estático y dinámico,	Juego no cooperativo estático y dinámico	Finalidad de su modelo es simular un sistema hidro-térmico basado en una Bolsa de energía.
Tapia & Pereira	2006	Presentar un modelo en el que la operación de cada subsistema se gestiona de forma independiente.	Juego no cooperativo- modelo Cournot-Nash	Los jugadores o los operadores de cada subsistema, llevan a cabo sus estrategias basadas en las cantidades producidas, lo que resulta un equilibrio Nash-Cournot.
Blyth et al.	2007	Desarrollar un modelo basado en el análisis de la evolución de	Juego a la Cournot del	Una de sus conclusiones es que una canasta diversificada conduce a

		estructura del mercado tecnológico en el mercado eléctrico.	aprendizaje computacional		una mayor competencia entre las generadoras y bajos precios.
Oliveira	2008	Presentar un juego de inversión utilizando el modelo Cournot en el mercado de electricidad	Modelo de Cournot	de	El autor analiza como la información influye en la inversión, el conocimiento común de los costos marginales, las expectativas sobre los costos marginales de los competidores, las expectativas sobre el nivel de la demanda y el comportamiento de los demás, influyen en el valor de un proyecto.
Ossa	2012	Analizar el comportamiento estratégico de los agentes generadores en el mercado eléctrico colombiano	Modelo oligopólico		Una de las conclusiones de este trabajo es que las grandes empresas de generación, se encuentran en una posible posición dominante para ejercer poder de mercado y por consiguiente menos competitivo.
Franco	2012	Analizar un modelo de mercado mayorista de energía de corto plazo mediante teoría de juegos	Modelo Cournot		Presenta un modelo de mercado mayorista de energía eléctrica de corto plazo, fundamentado en el modelo de mercado de Cournot y en la teoría de juegos, donde los participantes del juego son los agentes generadores.
Shafie-khah et al.	2013	Proponer un modelo de Mercado energético virtual, para investigar el comportamiento de los jugadores en el mercado energético, desde el punto de vista del regulador.	Modelo de juego dinámico	de	Los resultados indican que es importante simular la estrategia y el comportamiento colusivo antes de cualquier cambio en las reglas del mercado son necesarias.
García et al.	2013	Plantear un modelo exponencial para la función de oferta, teniendo en cuenta varias variables como el clima, la regulación, costos, etc.	Modelo Cournot	de	Se propone una metodología de acuerdo al mercado eléctrico colombiano (modelo exponencial, la técnica convulsión (similar a un filtro de Kalman) y un modelo de Cournot, para estimar los efectos que pueden tener los agentes sobre el precio spot, comportándose de una manera estratégica.
Duarte & García	2014	Estimar el precio marginal del sistema	Demanda Residual y el		Los resultados de la propuesta muestran, un mayor

		eléctrico colombiano: una mirada desde la organización industrial	Índice de Herfindahl e Hirschman	de comportamiento estratégico de las hidráulicas con relación a las térmicas, cuando se presenta una baja demanda, esto se debe a la capacidad de almacenamiento de las hidráulicas. En caso contrario, cuando la demanda es alta, las térmicas son más estratégicas, por la reducción de los recursos (agua) de la hidráulica
Askari et al.	2015	Plantear un modelo para simular el mercado energético reestructurado considerando la demanda, el precio del combustible, las incertidumbres del viento, el comportamiento estratégico de los inversionistas y la Feed in Tariff (FIT) fija y variable.	Modelo de Cournot	Los autores simulan un modelo la incertidumbre y el impacto de la política regulatoria Feed in Tariff (FIT) tanto fija como variable. Los resultados describen el impacto que tiene FIT sobre la rentabilidad promedio de los inversionistas y el efecto al aumentar el precio límite sobre la ganancia promedio total del mercado de electricidad.
Yang et al.	2018	Proponer un juego de información incompleta para la estrategia de precios entre varias empresas de electricidad.	Juego bayesiano	JEL juego bayesiano es adecuado para modelar situaciones bajo información incompleta.
Motalleb et al.	2018	Aplicar un juego teórico repetido para modelar la competencia entre agentes.	Juego No cooperativo - Stackelberg	Los resultados mostraron que las ganancias de los jugadores disminuyeron en el juego regulado (líder para controlar las transacciones entre los agentes y el precio) en comparación con la competencia no regulada (no límites).
de Frutos-Cachorro et al.	2020	Diseñar un modelo estructural para analizar la incertidumbre sobre la eliminación de la energía nuclear en el sistema energético de Bélgica.	Combinación entre modelos de optimización y teoría de juegos.	Los autores muestran que los incrementos en nueva capacidad de generación eléctrica se dan cuando se da una reducción en la energía nuclear y mayores niveles de competencia en el mercado.

Wang et al.	2020	Proponer un modelo de planeación de generación multinivel en el mercado eléctrico chino.	Juego no cooperativo	Los resultados indican que, al darse una reducción en la competencia, los agentes pueden disminuir la inversión creando una situación de escasez de oferta y de esta manera subir los precios de mercado.
Andoni et al.	2021	Plantear un modelo para estudiar las interacciones estratégicas entre los jugadores que invierten en redes eléctricas, generación renovable y capacidad de almacenamiento.	Modelo Stackelberg-Cournot no cooperativo	El modelo proporciona un mecanismo para analizar la toma de decisiones de los inversionistas e investigar las tarifas viables que fomenten la inversión en redes de electricidad para la energía renovable.
Aryani et al.	2021	Proponer un modelo regulatorio para coordinar las inversiones en generación convencionales y renovables.	Teoría de Juegos	El modelo considera al mismo tiempo, los objetivos del regulador para las consideraciones tecno-ambientales como las preocupaciones de los GENCO sobre los riesgos de inversión.

Fuente: elaboración propia a partir de autores citados.

Los estudios relacionados, ponen de manifiesto, que la modelación de mercados oligopólicos es útil ya que a través de ellos se pone en evidencia una mejor comprensión del mercado de generación en el contexto competitivo que envuelve el sector. Esto permite visualizar la importancia de profundizar en el análisis de la simetría o asimetría de la información, al momento de la tomar de decisiones de inversión para las empresas líderes o seguidoras. A continuación se presentan dos juegos de inversión, con información completa e imperfecta en tres etapas, que permita la identificación del equilibrio de los jugadores en un mercado oligopolístico.

Modelo

Con fines ilustrativos se plantea un juego de inversión (duopolio) en el mercado de electricidad para ilustrar la importancia de la estrategia competitiva. La descripción del ejemplo, se muestra a continuación:

Un Sistema energético requiere invertir en nuevas tecnologías de generación para cubrir los incrementos de la demanda de energía, el propósito es promover la entrada de nuevos proyectos (energía renovable) que permitan un reemplazo progresivo de las unidades con costos elevados, como las que utilizan combustibles líquidos, por unas que logren subsanar esta situación en el mediano y corto plazo.

El mercado actual tiene una planta, Titular (T), que atiende todo el mercado, con una capacidad instalada nominal igual a 40 MW con costos igual a $C_2=4q^2$. Una empresa competidora, Potencial Entrante (PE), está interesada en entrar al mercado. El Titular sabe esto y decide si se anticipa a la inversión para reforzar su posición o dejar entrar al otro.

Para darle solución a este problema, se han planteado dos juegos de inversión. La primera propuesta es un juego secuencial de tres etapas con completa información. El segundo, también es un juego de tres etapas pero con información incompleta.

Juego de inversión secuencial con perfecta información

El juego tiene los siguientes componentes:

- Jugadores: Dos generadores (Jugador 1: Potencial entrante y Jugador 2: Titular) de energía que compiten en un duopolio deciden invertir o no invertir en una nueva capacidad. Las características de la inversión se pueden observar en la siguiente tabla.

Tabla 2
 Las características de la inversión

Firma	Capacidad a Instalar (MW)	Precio* (\$/MWh)	Inversión Inicial (Millones)**	Factor de planta
Titular	25	38	140	100%
Potencial Entrante	25	38	160	100%

Fuente: Elaboración propia. *Los precios de electricidad son hallados teniendo en cuenta los costos variables, costos fijos, la inversión inicial. Los datos son obtenidos en (IRENA, 2018).

Los jugadores conocen la estructura del juego, es decir, conocen el conjunto de acciones y los pagos de todos los jugadores además de la racionalidad de todos ellos.

- Acciones: El jugador 1 (Potencial Entrante) debe elegir entre las acciones: Invertir (I)- No Invertir (NI) y luego el jugador 2 (Titular) una vez que ha observado la acción del Potencial Entrante decide si invierte o no invierte. Los jugadores Compiten en cantidades.
- Información: Los jugadores conocen la capacidad y los costos de cada tecnología. Este es un juego secuencial de tres etapas. Las firmas venden bienes homogéneos. El nivel de generación real corresponde a la cantidad de energía generada en un periodo de tiempo, este se obtiene por la multiplicación entre la capacidad nominal de la planta (MW) y el factor de planta. No hay incertidumbre del clima, por lo que el factor de planta es igual a 100%.
- Estrategias: Las estrategias de cada jugador son las siguientes:
 Jugador 1: {Invertir; No Invertir}.

Jugador 2: {Invertir-Invertir; No Invertir – Invertir; Invertir – No Invertir; No Invertir – No Invertir}.

- Pagos: Los pagos dependen de las elecciones de los jugadores y del tipo de mercado que resulta después de hacer esas elecciones (ver tabla 3).

Tabla 3
 Criterios para la construcción de la Matriz de Pagos

Acción	Estrategia	Tipo de Mercado	Nueva Capacidad (MW)	Potencial Entrante		Capacidad total (MW)	Titular		Cantidad total del Sistema (MW)
				Cantidad óptima (MW)	Beneficio		Cantidad óptima (MW)	Beneficio	
No invierte Potencial Entrante	No Invierte Titular	Monopolio	0	0	0	40 + 0 = 40	Monopolio	Beneficio Titular	40
	Invierte Titular		0	0	0	40 + 25 = 65	Monopolio Multiplanta	Beneficio Titular	65
Invierte Potencial Entrante	No Invierte Titular	Competencia	25	Cantidad Cournot	Beneficio Potencial Entrante	40 + 0 = 40	Cantidad Cournot	Beneficio Titular	65
	Invierte Titular	Duopolio (Modelo Cournot)	25	Cantidad Cournot	Beneficio Potencial Entrante	40 + 25 = 65	Cantidad Cournot	Beneficio Titular	90

Fuente: Elaboración propia

Además, se tiene una demanda inversa igual a $P=100-Q$. Costos totales de la planta instalada es igual a $C_2=4q_2$ y las plantas nuevas: Jugador 1 (PE): $C_1=500 - q_1^2$; Jugador 2 (T): $C_2=2q_2^2$; Con la información anterior, el juego se puede representar gráficamente, ver figura 2.

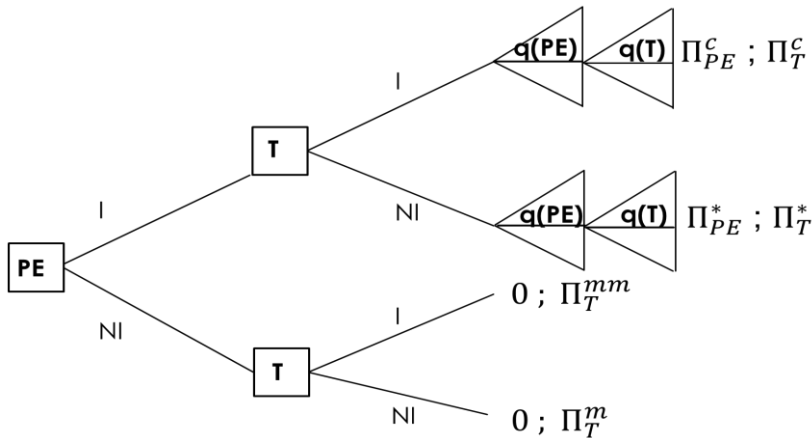


Figura 2. Juego de información perfecta en forma Extensiva.

Fuente: Elaboración propia.

Los pagos de cada decisión se hallan de acuerdo a las fórmulas presentadas en la tabla 4 y con la información obtenida se desarrolla el juego.

Tabla 4
 Cálculo de los beneficios de cada decisión

Estrategia	Cálculo de los beneficios
Potencial entrante no invierte; Titular no invierte.	$\pi_i^m = (100 - q)q - 4q^2$
Potencial entrante no invierte; Titular Invierte.	$\pi_i^{mm} = (100 - (q_2^{TV} + q_2^{TN}))(q_2^{TV} + q_2^{TN}) - 4q_2^{2TV} - 2q_2^{2TN}$ Donde: C_2^{TV} : costo planta Titular – capacidad instalada, C_2^{TN} : costo planta Titular – planta nueva.
Potencial entrante invierte; Titular Invierte.	$\pi_i^{PE} = (100 - (q_i + q_j))(q_i) - 500 - q_i^2$
Potencial entrante Invierte; Titular No Invierte.	$\pi_i^{PE} = (100 - (q_i + q_j))(q_i) - 500 - q_i^2$

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos se especifican en la figura 3.

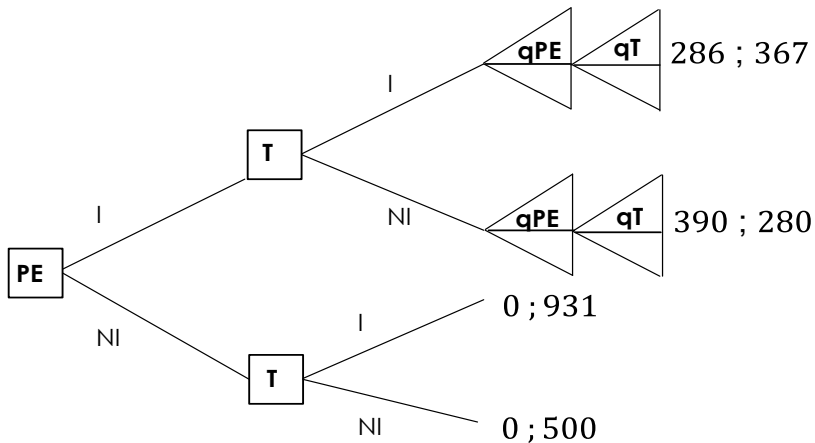


Figura 3. Juego de información perfecta en forma Extensiva con sus respectivas utilidades.
 Fuente: Elaboración propia.

Para resolver este juego, se utiliza el método de inducción hacia atrás, se empieza por el final del juego y se encuentra la decisión óptima del jugador en el turno que le corresponde, es decir se mueve nodo por nodo desde el final del juego hasta el principio y encontrar la acción óptima en cada nodo. El

primero en decidir es el Titular dependiendo de sus pagos. Después de realizar la inducción hacia atrás en cada nodo, se llega al equilibrio cuando ambas empresas invierten obteniendo un resultado en sus pagos igual a $\{286;367\}$ (ver figura 4).

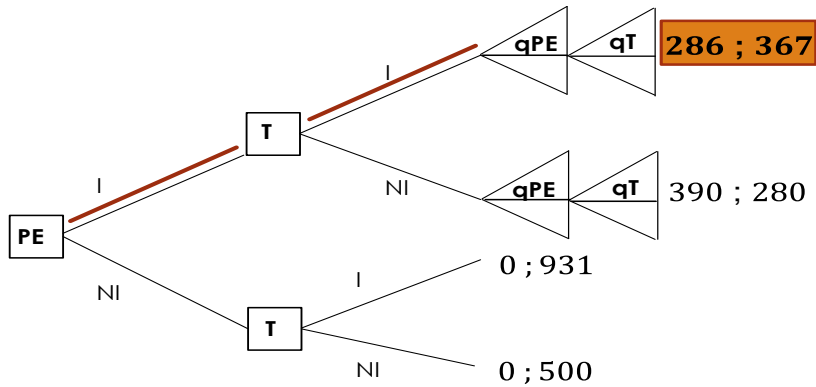


Figura 4. Juego de información perfecta en forma Extensiva con equilibrio óptimo.
 Fuente: Elaboración propia

Juego de inversión secuencial con información incompleta

Algunas tecnologías, como la hidráulica, Eólica, Solar, entre otras, presentan el inconveniente de que no se pueda conocer con exactitud la generación de electricidad real que se pueda obtener, ya que sus principales insumos son el agua, el viento, el sol y estos dependen del clima. La firma Titular, por su conocimiento en el mercado puede conocer la generación de energía real, el cual es reflejado por el factor de planta alto (100%) con una probabilidad de $p=1/2$ o bajo (50%) con una probabilidad de $1-p=1/2$, pero la empresa 2 no lo sabe. Se asume los mismos supuestos del juego anterior, con relación a las características de las nuevas plantas. Dado lo anterior, el juego se plantea como se observa en la figura 5.

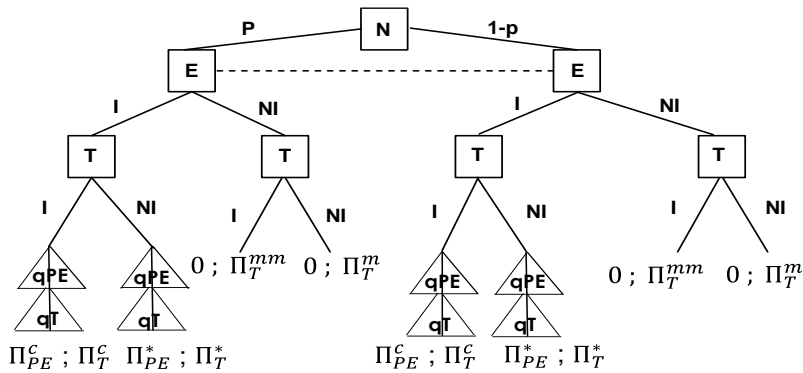


Figura 5. Juego de información Incompleta en forma Extensiva.
 Fuente: Elaboración propia.

Para desarrollar este juego, inicialmente se deben encontrar los pagos de cada decisión:

- Potencial entrante invierte-Titular Invierte:
 e tiene $P = 100 - Q$; $C_1 = 500 - q_1^2$; $C_2 = 2q_2^2$.

En este caso la firma 2 presenta dos tipos: cantidad alta (factor de planta alto), cantidad baja (factor de planta bajo).

Cantidad de energía real = Capacidad x Factor de Planta

Pago de la firma 2, cuando cantidad de energía real es alta (q_2^H , factor de planta =100%):

$$\pi_2^T = (100 - (q_1 + q_2^H))(q_2^H) - 2q_2^{2H}$$

$$\pi_2^T = 100q_2^H - q_1q_2^H - q_2^{2H} - 2q_2^{2H}$$

Luego se hallan las condiciones de primer orden, se obtiene: $q_2^H = \frac{100 - q_1}{6}$, luego se multiplica por el factor de planta:

$$q_2^H = \left(\frac{100 - q_1}{6}\right) * 100\% = \left(\frac{100 - q_1}{6}\right) \tag{1}$$

Pago de la firma 2, cuando cantidad de energía real es baja (q_2^L , factor de planta =50%):

$$\pi_2^L = (100 - (q_1 + q_2^L))(q_2^L) - 2q_2^{2L}$$

Luego se hallan las condiciones de primer orden $q_2^L = \frac{100 - q_1}{6}$. Este resultado se multiplica por el factor de planta:

$$q_2^L = \left(\frac{100 - q_1}{6}\right) * 50\% = \left(\frac{100 - q_1}{12}\right) \tag{2}$$

Ahora, se debe hallar la cantidad óptima de la firma 1:

$$\pi_1^{PE} = \frac{1}{2}((100 - (q_1 + q_2^H))(q_1) - 500 - q_1^2) + \frac{1}{2}((100 - (q_1 + q_2^L))(q_1) - 500 - q_1^2)$$

Se hallan las condiciones de primer orden, obteniendo el resultado:

$$q_1 = \frac{200 - q_2^H - q_2^L}{8} \quad (3)$$

Ahora reemplazando (1) y (2) en (3), se obtiene:

$$q_1^* = \frac{2100}{93} = 22.508 = 23 \quad (4)$$

Con la información anterior se determinan los beneficios de cada empresa.

➤ Potencial entrante Invierte-Titular No Invierte:

El Titular no invierte en nueva capacidad, $q_2^H = q_2^L = 0$

$$\pi_1^{PE} = \frac{1}{2}((100 - (q_1 + q_2^H))(q_1) - 500 - q_1^2) + \frac{1}{2}((100 - (q_1 + q_2^L))(q_1) - 500 - q_1^2)$$

Se hallan las condiciones de primer orden para hallar las cantidades. Este mismo procedimiento se hace para hallar las cantidades del Titular. Después de hallar las cantidades óptimas, se hallan los beneficios de cada jugador π_1^{PE} y π_2^T .

➤ Potencial entrante no invierte-Titular no invierte: En este caso se sigue conservando el monopolio por parte de la firma Titular, para hallar los beneficios se desarrolló lo siguiente:

El ingreso del monopolista es $I(q) = P(q) * q$, $P = 100 - q$; $C_2 = 4q_2$. El pago de la firma 2, cuando cantidad de energía real es alta (q_2^H , factor de planta =100%):

$$\pi_2^{mT} = (100 - q_2^H)(q_2^H) - 4q_2^{2H}$$

El pago de la firma 2, cuando cantidad de energía real es bajo (q_2^L , factor de planta =50%):

$$\pi_2^{mT} = (100 - q_2^L)(q_2^L) - 4q_2^{2L}$$

Los beneficios de la PE son iguales a cero, dado que no invierte.

➤ Potencial entrante no invierte-Títular Invierte: este caso es un monopolio Multiplanta.

Se tiene $P = 100 - Q$; $C_2^{TV} = 4q_2^{2V}$; $C_2^{TN} = 2q_2^{2T}$.

Donde: C_2^{TV} : costo planta Títular – capacidad instalada, C_2^{TN} : costo planta Títular – planta nueva. Se tiene un costo de inversión inicial de la planta nueva igual a 140.

El pago de la firma 2, cuando cantidad de energía real es alta (factor de planta =100%):

$$\pi_2^{mm} = (100 - (q_2^{TV} + q_2^{TN})) * (q_2^{TV} + q_2^{TN}) - 4q_2^{2TV} - 2q_2^{2TN}$$

El pago de la firma 2, cuando cantidad de energía real es baja (factor de planta =50%):

$$\pi_2^{mm} = (100 - (q_2^{TV} + q_2^{TN})) * (q_2^{TV} + q_2^{TN}) - 4q_2^{2TV} - 2q_2^{2TN}$$

Después de obtener los pagos de cada decisión, ya se puede hallar cual es el equilibrio de este juego (ver figura 6).

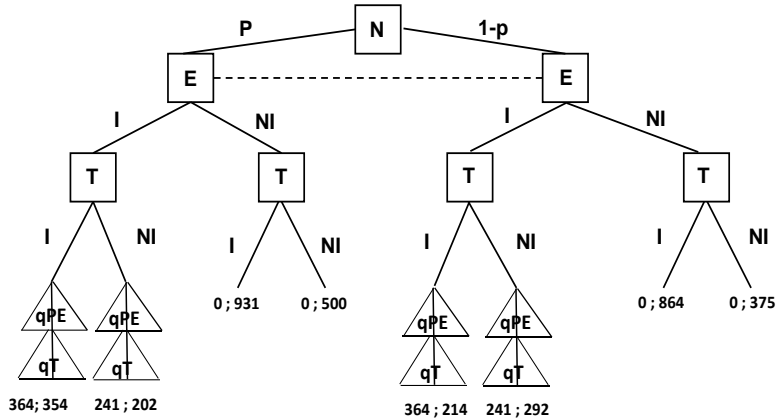


Figura 6. Juego de información Incompleta en forma Extensiva con los pagos.
 Fuente: Elaboración propia.

Este juego tiene la representación de Harsanyi (1967) (Harsanyi, 1967) donde N corresponde a una movida de la naturaleza.

Las estrategias de cada jugador son:

Jugador 1 (Potencial Entrante): {Invertir; No Invertir}.

Jugador 2 (Titular): {Invertir-Invertir; No Invertir – Invertir; Invertir – No Invertir; No Invertir – No Invertir}.

La forma estratégica el juego, dada las estrategias definidas es la tabla 5:

Tabla 5
 La forma estratégica el juego de información incompleta

		Jugador 2 (T)			
		I-I	NI-I	I-NI	NI-NI
Jugador 1 (PE)	I	<u>364</u> ; 284	<u>303</u> ; 208	<u>303</u> ; <u>323</u>	<u>241</u> ; 247
	NI	0 ; 898	0 ; 682	0 ; 653	0 ; 438

De acuerdo con los resultados anteriores, se observa:

Para Potencial Entrante la estrategia I domina a NI. La mejor estrategia para PE es I.

Para Titular: Tipo 1: NI es preferible a I: INI domina II, INI domina a NINI

Para Titular: Tipo 2: NI es preferible a I: INI domina II, INI domina a NINI

En este caso hay un equilibrio de Nash en estrategias puras: {I ; I-NI}

Conclusiones

Con el desarrollo de esta propuesta, se puede corroborar que las decisiones en los mercados oligopólicos son interdependientes y se enfrentan al comportamiento estratégico de los competidores, creando espacios de interés para el análisis de la asimetría de la información.

De acuerdo con los trabajos presentados, se observa que los juegos no cooperativos y los modelos oligopólicos, especialmente el Cournot, son ampliamente utilizados para describir el funcionamiento de este tipo de mercado. También es importante mencionar que el conocimiento de la información puede afectar el valor del proyecto y si se habla del mercado de energía, existe la posibilidad de darse una mayor expansión del sector al aumentar los inversionistas y por consiguiente se puede brindar mayor seguridad al sistema.

Cuando se tiene toda la información, el equilibrio para los inversionistas Potencial Entrante y Titular es invertir dado que para Titular es mejor invertir si entra en competencia, pues obtendrá un mayor beneficio comparado con la estrategia de no invertir. Además, esta empresa debe cuidar su cuota de mercado para conservar sus clientes. Este juego no presenta incertidumbre por las condiciones del mercado o variables externas como el clima por lo que las cantidades ofrecidas son más altas.

El juego de información incompleta, el equilibrio del juego, en estrategias puras, es $\{I ; I-NI\}$. La estrategia Invertir domina a No invertir, jugador 1 (Potencial Entrante). No invertir domina a Invertir para el jugador 2 (Titular).

La empresa Titular recibe un mayor beneficio cuando la Potencial Entrante no invierte, este es aún mayor cuando es un monopolio Multiplanta, es decir, Titular invierte. La firma Potencial entrante obtendrá un mayor beneficio si la inversión inicial fuera un poco más baja y no pagar una cuota por entrar al mercado.

La incertidumbre puede afectar las decisiones de los agentes, pues no pueden predecir el efecto que sus acciones tendrán en el otro jugador (aunque suponga que los demás participantes actuarán racionalmente).

La propuesta de este juego de inversión solo tiene en cuenta la incertidumbre de la competencia entre los agentes, para aun mayor análisis y mejores resultados se propone la utilización de otras metodologías, como las Opciones de Juego, que combina las Opciones Reales con la teoría de juegos. Con la metodología Opciones de Juego, el inversionista obtendrá una evaluación más completa para la toma de decisiones de inversión, porque esta herramienta incorpora la flexibilidad e incertidumbre de mercado y la interacción estratégica entre agentes económicos, en este caso los generadores de inversión.

Referencias

- Abapour, S., Mohammadi-Ivatloo, B., & Tarafdar Hagh, M. (2020). A Bayesian game theoretic based bidding strategy for demand response aggregators in electricity markets. *Sustainable Cities and Society*, 54(July 2019), 101787. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101787>
- Ahmad, S., Mat Tahar, R., Muhammad-Sukki, F., Munir, A. B., & Abdul Rahim, R. (2016). Application of system dynamics approach in electricity sector modelling: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.034>
- Alishahi, E., Moghaddam, M. P., & Sheikh-El-Eslami, M. K. (2011). An investigation on the impacts of regulatory interventions on wind power expansion in generation planning. *Energy Policy*, 39(8), 4614–4623. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.05.002>
- Alizadeh, B., & Jadid, S. (2015). A dynamic model for coordination of generation and transmission expansion planning in power systems. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 65, 408–418. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.10.007>
- Andoni, M., Robu, V., Couraud, B., Früh, W. G., Norbu, S., & Flynn, D. (2021). Analysis of strategic renewable energy, grid and storage capacity investments via Stackelberg-cournot modelling. *IEEE Access*, 9, 37752–37771. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3062981>
- Aryani, M., Ahmadian, M., & Sheikh-El-Eslami, M. K. (2021). Coordination of risk-based generation investments in conventional and renewable capacities in oligopolistic electricity markets: A robust regulatory tool. *Energy*, 214, 118856. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118856>
- Askari, M. T., Ab Kadir, M. Z. A., & Bolandifar, E. (2015). Evaluation of FIT impacts on market clearing price in the restructured power market. 2015 IEEE Student Conference on Research and Development, SCORed 2015, 224–227. <https://doi.org/10.1109/SCORED.2015.7449329>
- Blyth, W., Bradley, R., Bunn, D., Clarke, C., Wilson, T., & Yang, M. (2007). Investment risks under uncertain climate change policy. *Energy Policy*, 35(11), 5766–5773. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.05.030>
- Carpio, G. T. L., & Pereira, A. (2006). Independent operation by subsystems: Strategic behavior for the Brazilian electricity sector. *Energy Policy*, 34(17), 2964–2976. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.05.015>
- Carvajal, S., & Jiménez, J. M. (2012). Impacto de la generación distribuida en el sistema eléctrico de potencia colombiano: un enfoque dinámico. *Revista Tecnura*, 17(35), 77–89. <https://doi.org/10.14483/rt.v17i35.518>

- Chuang, A. S., Wu, F., & Varaiya, P. (2001). A game-theoretic model for generation expansion planning: problem formulation and numerical comparisons. *IEEE Transactions on Power Systems*, 16(4), 885–891. <https://doi.org/10.1109/59.962441>
- de Frutos-Cachorro, J., Willeghems, G., & Buysse, J. (2020). Exploring investment potential in a context of nuclear phase-out uncertainty: Perfect vs. imperfect electricity markets. *Energy Policy*, 144(May), 111640. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111640>
- Dixit, Avinash K., & Nalebuff, B. j. (1991). *Thinking Strategically: The competitive edge in business, politics and every life*. United States: Castle House. [https://doi.org/10.1016/0024-6301\(92\)90210-s](https://doi.org/10.1016/0024-6301(92)90210-s)
- Dubash, N. K. (2002). The Politics of Electric Power Restructuring in Developing Countries. In M. C. Harris (Ed.), *Energy Market Restructuring and the Environment: Governance and Public Goods in Globally Integrated Markets* (pp. 69–92).
- Fabra, N., & Toro, J. (2005). Price wars and collusion in the Spanish electricity market. *International Journal of Industrial Organization*, 23(3–4), 155–181. <https://doi.org/10.1016/j.ijindorg.2005.01.004>
- Ferrero, R. W., & Ramesh, V. C. (1997). Transaction Analysis in Deregulated Power Systems Using Game Theory. *IEEE Transactions on Power Systems*, 12(3), 1340–1347. <https://doi.org/10.1109/59.630479>
- Fischer, R. (2012). *Curso de Organización Industrial*. Chile. Disponible en: <https://n9.cl/y8tp5> y Consultado en julio 2020
- Fitiwi, D. Z., De Cuadra, F., Olmos, L., & Rivier, M. (2015). A new approach of clustering operational states for power network expansion planning problems dealing with RES (renewable energy source) generation operational variability and uncertainty. *Energy*, 90, 1360–1376. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.078>
- Fosso, O. B., Gjelsvik, A., Haugstad, A., Mo, B., & Wangensteen, I. (1999). Generation scheduling in a deregulated system. The Norwegian case. *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(1), 75–80. <https://doi.org/10.1109/59.744487>
- Franco Arboleda, F. F. (2012). Análisis de un modelo de mercado mayorista de energía de corto plazo mediante teoría de juegos. Disponible en: <https://repositorio.utp.edu.co/items/46d26942-7ec0-4920-84e2-6b065c5a0d98> y Consultado en julio 2020
- García, A., & Arbelaez, L. E. (2002). Market power analysis for the colombian electricity market. *Energy Economics*, 24, 217–229. Disponible en: [http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140-9883\(02\)00015-4](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140-9883(02)00015-4) y Consultado en julio 2020

- García, A., Mili, L., & Momoh, J. (2010). Modeling Electricity Markets: A Brief Introduction. In J. Momoh & L. Mili (Eds.), *Economic Market Design and Planning for Electric Power Systems* (pp. 21–42). New Jersey: Wiley. Disponible en: <https://onx.la/0f7a2> y Consultado en julio 2020
- García, J., Bohórquez, S., López, G., & Marín, F. (2013). Poder de Mercado en Mercados Spot de generación eléctrica: metodología para su análisis (No. 13–05). Medellín, Colombia. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10784/678> y Consultado en julio 2020
- Gil, E., Aravena, I., & Cárdenas, R. (2014). Generation Capacity Expansion Under Hydro Uncertainty Using Stochastic Mixed Integer Programming and Scenario Reduction. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(4), 1–10. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2351374>
- Harsanyi, J. (1967). Games with incomplete information played by Bayesian Players, I-III. *Management Science*, 13(3), 159–182. <http://www.dklevine.com/archive/refs41175.pdf>
- Hobbs, B. F. (1995). Optimization methods for electric utility resource planning. *European Journal of Operational Research*, 83, 1–20. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)00190-N](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00190-N)
- Irena. (2018). Power generation costs in 2017. International Renewable Energy Agency. <https://onx.la/90a96>
- Lise, W., Linderhof, V., Kuik, O., Kemfert, C., Östling, R., & Heinzow, T. (2006). A game theoretic model of the Northwestern European electricity market-market power and the environment. *Energy Policy*, 34(15), 2123–2136. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.03.003>
- Lopez, S., Baum, G. F., Olsina, F. G., Blanco, G. A., & Rehtanz, C. (2017). Option games applied for investment in power generation capacity. 2017 IEEE Manchester PowerTech, Powertech 2017. <https://doi.org/10.1109/PTC.2017.7981085>
- Maceira, M. E. P., Marzano, L. G. B., Penna, D. D. J., Diniz, A. L., & Justino, T. C. (2015). Application of CVaR risk aversion approach in the expansion and operation planning and for setting the spot price in the Brazilian hydrothermal interconnected system. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 72, 126–135. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.02.025>
- Mercure, J. F., Paim, M. A., Bocquillon, P., Lindner, S., Salas, P., Martinelli, P., Vinuales, J. E. (2019). System complexity and policy integration challenges: The Brazilian Energy- Water-Food Nexus. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105(February), 230–243. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.045>
- Motalleb, M., Annaswamy, A., & Ghorbani, R. (2018). A real-time demand response market through a repeated incomplete-information game. *Energy*, 143, 424–438. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.129>
- Navidi, H., & Bidgoli, M. M. (2011). International Journal of Management Science and An all-unit quantity discount model under a Cournot competition with incomplete information An all-unit

- quantity discount model under a Cournot competition with incomplete information. *International Journal of Management Science*, 6(5), 393–400. <https://doi.org/10.1080/17509653.2011.10671188>
- Niknam, T., Sharifinia, S., & Azizipanah-Abarghooee, R. (2013). A new enhanced bat-inspired algorithm for finding linear supply function equilibrium of GENCOs in the competitive electricity market. *Energy Conversion and Management*, 76, 1015–1028. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.08.012>
- Oliveira, F. (2008). The value of information in electricity investment games. *Energy Policy*, 36(7), 2364–2375. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.01.005>
- Ossa L., D. F. (2012). Análisis del comportamiento estratégico de los agentes generadores en el mercado eléctrico colombiano, 108-128. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/11053> y Consultado en julio 2020
- Pereira, A. J. C., & Saraiva, J. T. (2013). A long term generation expansion planning model using system dynamics-Case study using data from the Portuguese/Spanish generation system. *Electric Power Systems Research*, 97, 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.12.001>
- Phupha, V., Lantharthong, T., & Rugthaicharoencheep, N. (2012). Generation Expansion Planning Strategies on Power System: A Review. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 64(1), 480–483. Disponible en: <https://onx.la/52a45> y Consultado en julio 2020
- Pindyck, R. S., & Rubinfeld, D. L. (2009). *Microeconomía*. (A. Cañizal, Ed.) (Séptima ed). Pearson Educación, S.A. Disponible en: <https://onx.la/987ed> y Consultado en julio 2020
- Pinto, T., Barreto, J., Praca, I., Sousa, T. M., Vale, Z., & Pires, E. J. S. (2015). Six thinking hats: A novel metalearner for intelligent decision support in electricity markets. *Decision Support Systems*, 79, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2015.07.011>
- Rouhani, A., Varamini, G., & Nikkiah, M. (2013). Generation Expansion Planning Considering Renewable Energies. *American Journal of Engineering Research*, 2(11), 276–286. Disponible en: [https://www.ajer.org/papers/v2\(11\)/ZE211276286.pdf](https://www.ajer.org/papers/v2(11)/ZE211276286.pdf) y Consultado en julio 2020
- Shafie-khah, M., Parsa Moghaddam, M., & Sheikh-El-Eslami, M. K. (2013). Development of a virtual power market model to investigate strategic and collusive behavior of market players. *Energy Policy*, 61, 717–728. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.003>
- Smit, H. T. J., & Trigeorgis, L. (2004). *Strategic investment: Real options and games*. Strategic Investment: Real Options and Games. Princeton University Press. Disponible en: <https://press.princeton.edu/books/hardcover/9780691010397/strategic-investment> y Consultado en julio 2020

- Varian, H. R. (2010). *Intermediate Microeconomics: A Modern Approach*. (J. Repcheck, Ed.), University of California (Eighth Edi). New York: W. W. Norton & Company. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Vega, M. A. (2006). El Mercado Hidrotérmico Chileno : Un Enfoque De Teoría De Juegos. *Cuadernos de Economía*, XXV (45), 155–203. Disponible en: <https://onx.la/4a7e7> y Consultado en julio 2020
- Venslauskas Duarte, O., & García, J. J. (2014). Estimación del precio marginal del sistema eléctrico colombiano: una mirada desde la organización industrial. *Ecos de Economía*, 19(41), 1–23. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.17230/ecos.2015.41.1>
- Ventosa, M. J., Denis, R., & Redondo, C. (2002). Expansion planning in electricity markets. Two different approaches. *Proceedings of the 14th PSCC Conference*, (June), 24–28. Disponible en: http://www.pscs-central.org/uploads/tx_ethpublications/s43p04.pdf y Consultado en julio 2020
- Waldman, D. E., & Jensen, E. J. (2013). *Industrial organization : theory and practice* (4th ed.).
- Wang, Z., Shu, J., Liu, S., Wang, X., & Zheng, H. (2020). A nested genetic algorithm for generation planning in electricity market. 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration: Connecting the Grids Towards a Low-Carbon High-Efficiency Energy System, EI2 2020, 1998–2003. <https://doi.org/10.1109/EI250167.2020.9347024>
- Wolfram, C. D. (1999). Measuring Duopoly Power in the British Electricity Spot Market Catherine D . Wolfram. *The American Economic Review*, 89(4), 805–826. Disponible en: <https://www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/aer.89.4.805> y Consultado en julio 2020
- Yang, J., Tian, Z., Ma, K., Wang, C., & Liu, Z. (2018). A Bayesian Game Approach for Noncooperative Pricing among Multiple Utility Companies in Smart Grid. *IEEE Access*, 6, 68576–68585. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2879882>
- Zhang, C., Ding, Y., & Kang, C. (2013). Multi-objective Generation Expansion Planning for Integrating Large- scale Wind Generation. *AORC-CIGRE Technical Meeting*, 0001, 336–344. Disponible en: <https://onx.la/b0523> y Consultado en julio 2020