

Revisión de herramientas aplicadas al modelamiento de mercados de electricidad

A review of electricity market modelling tools

Sandra Milena Londoño Hernández¹ y Carlos Arturo Lozano Moncada²

RESUMEN

La desregulación de los mercados de electricidad alrededor del mundo, en la búsqueda de la eficiencia, ha introducido competencia en los sectores de comercialización y generación de energía. Por esta razón, ha adquirido gran importancia, para reguladores y oferentes, estudiar la interacción de los agentes competitiivos para analizar la evolución del mercado y definir adecuadamente estrategias de ofertamiento. Por lo tanto, en los últimos años se han utilizado diferentes herramientas para modelar los mercados de electricidad competitivos; este artículo presenta una revisión analítica de la bibliografía encontrada en el tema, en la cual se presentan las herramientas más utilizadas, además de sus ventajas y desventajas. Para realizar este análisis se hicieron comparaciones entre los modelos utilizados en cada herramienta, identificando las principales características del mercado, tales como esquema de mercado, estructura de las ofertas, tipo de subasta, entre otras. De este análisis se concluye que el tipo de herramienta a utilizar depende en gran medida del objetivo y alcance que se busca con el estudio.

Palabras clave: mercados de electricidad, modelamiento de mercados, desregulación.

ABSTRACT

Deregulating electricity markets around the world in the search for efficiency has introduced competition into the electricity marketing and generation business. Studying interactions amongst the participants has thus acquired great importance for regulators and market participants for analysing market evolution and suitably defining their bidding strategies. Different tools have therefore been used for modelling competitive electricity markets during the last few years. This paper presents an analytical review of the bibliography found regarding this subject; it also presents the most used tools along with their advantages and disadvantages. Such analysis was done by comparing the models used, identifying the main market characteristics such as market structure, bid structure and kind of bidding. This analysis concluded that the kind of tool to be used mainly depends on a particular study's goal and scope.

Keywords: electricity market, market modelling, deregulation.

Recibido: octubre 2 de 2008

Aceptado: octubre 23 de 2009

Introducción

Los mercados de electricidad a nivel mundial se han establecido inicialmente como verticalmente integrados, donde un solo organismo se encarga de prestar los servicios de generación, transmisión y distribución, y además, es quien determina el precio de la energía (Philipson y Willis, 2006). Debido a que este mercado de monopolio no es eficiente, se han generado cambios a nivel mundial buscando utilizar de manera eficiente los recursos disponibles (Rudnick, 1998; Arango *et al.*, 2006). Con ellos cambios se ha introducido la competencia en el sector de generación y comercialización.

Para mantener una competencia efectiva se ha visto la necesidad de modelar estos mercados, para que los agentes, tanto reguladores como generadores, tengan herramientas que les sirvan de punto de referencia para tomar sus decisiones. Por esta razón, se han utilizado diversas técnicas y modelos para representarlo.

Distintas revisiones bibliográficas se han presentado en la literatura analizada, incluyendo: métodos para desarrollar estrategias de ofertamiento (David y Wen, 2000), tendencias en modelamiento de mercado (Ventosa *et al.*, 2005) y pronóstico de precio (Conejo *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2005). A continuación, un estado del arte actualizado en modelamiento de mercados, descritos de acuerdo a las técnicas o herramientas usadas y a algunas características importantes.

Herramientas utilizadas en modelamiento de mercados

A nivel general, en mercados competitivos se ha trabajado ampliamente en dos puntos fundamentales: representar el comportamiento de los generadores en el mercado y pronosticar el precio. En el primer punto se ha utilizado la teoría de juegos, y para pronóstico de precio, las series de tiempo y las redes neuronales.

¹ Ingeniera electricista, M.Sc. y estudiante, Ph.D. en Ingeniería con énfasis en eléctrica, Universidad del Valle, Colombia. Miembro del Grupo de Investigación en Alta Tensión – GRALTA. smlh_78@yahoo.com, sandralh@univalle.edu.co

² Ingeniero electricista y M.Sc., Universidad del Valle, Colombia. Ph.D., Universidad de Strathclyde, Reino Unido. Profesor asociado, Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica y Miembro del Grupo de Investigación en Alta Tensión – GRALTA, Universidad del Valle, Colombia. clozano@univalle.edu.co

Teoría de juegos

Es una herramienta matemática para representar y analizar problemas de conflicto donde los beneficios de un individuo dependen de las elecciones de otro. El juego se compone de: grupo de "jugadores", conjunto de movimientos (estrategias) y recompensas para cada combinación de estrategias (Nash, 1951). Los juegos se pueden variar de distintas formas, entre otras (De la Torre *et al.*, 2004):

- Interacción agentes: cooperativos y no cooperativos
- Clase de juego: simultáneos y secuenciales
- Tipo de información: perfecta e imperfecta o completa e incompleta

Por la forma en que los agentes definen su oferta, también hay modelos de equilibrio (Bompard *et al.*, 2006):

- Función de suministro
- Por cantidad (Cournot, Stackelberg)
- Por precio (Bertrand, Forchheimer)

El equilibrio de estos modelos se encuentra generalmente con base en la teoría de Nash (el mercado alcanza su punto de equilibrio cuando: "la estrategia de cada jugador es óptima contra la de los otros" (Nash, 1951)), y para hallarlo se han hecho diferentes contribuciones (De la Torre *et al.*, 2004; Hasan *et al.*, 2008; Barquín y Vázquez, 2008).

Equilibrio de función de suministro

En este modelo se utilizan funciones de suministro (precio-cantidad) para definir las estrategias de los participantes. Fue propuesto por (Klemperer y Meyer, 1989) para un mercado de oligopolio y usado como base por (Green y Newbery, 1992) con el objetivo de obtener uno para mercados de electricidad y analizar comportamientos estratégicos en duopolios simétricos, asimétricos y con restricciones de capacidad.

Algunos de estos modelos consideran, además, un tipo de modelo Stackelberg, donde las decisiones de los "seguidores" dependen de las que toman los "líderes", utilizando modelos de optimización de dos niveles, donde un participante maximiza su beneficio sujeto a una solución de flujo de potencia óptimo (FPO), que maximiza el beneficio social basado en todas las ofertas.

Modelo de Cournot

En este modelo se toman las cantidades como variables de decisión en la estrategia de ofertamiento de un participante. Ramos *et al.* (1998) han sido de los primeros en utilizar este modelo para un mercado de electricidad, incluyendo restricciones de equilibrio en un modelo de costo de producción detallado. Resaltan que se debe manejar muy bien la alta sensibilidad del modelo a la elasticidad de la demanda.

Variaciones conjeturales

Como una extensión a los modelos anteriores, se han incluido supuestos o conjeturas para tener en cuenta la reacción de los competidores cuando un participante está decidiendo su producción óptima. La reacción de los competidores puede depender de las funciones de suministro o de la curva de demanda, por lo tanto, se puede presentar: función de suministro de conjetura (CSF) (Day *et al.*, 2002) o variación conjetural (CV) (García Alcalde *et al.*, 2002; López de Haro *et al.*, 2007), respectivamente.

Técnicas de predicción

Cuando un generador está definiendo su estrategia de ofertamiento, un parámetro que le puede ser de gran utilidad es el precio de despeje en el mercado para el día de su oferta; por esta razón, se han utilizado diferentes técnicas de predicción.

Series de tiempo

Para el análisis de series de tiempo se han desarrollado modelos estadísticos que buscan una relación entre los valores históricos y actuales de una variable, la cual se caracteriza por tener un patrón de comportamiento en el tiempo. Con los valores históricos, se determinan los parámetros del modelo para que sea utilizado en la predicción de la variable en un tiempo determinado. En la literatura revisada, para la predicción del precio marginal en mercados de electricidad se encuentran:

- Clasificador Bayesiano + modelo de autorregresión (AR) (Ni y Luh, 2001)
- Modelo de regresión dinámica (Nogales *et al.*, 2002)
- Función de transferencia (Nogales *et al.*, 2002; Nogales y Conejo, 2006)
- Modelo autorregresivo integrado con promedios móviles (Arima) (Contreras *et al.*, 2003)
- Modelo autorregresivo (AR) (Crespo *et al.*, 2004)
- Modelo autorregresivo con promedios móviles (Arma) (Crespo *et al.*, 2004)
- Modelo de componentes no observadas (Crespo *et al.*, 2004)
- Heteroskedastic condicional autorregresivo generalizado (GARCH) (García *et al.*, 2005)

Inteligencia artificial

Dentro de la inteligencia artificial, lo más utilizado para la predicción de precio son los modelos de redes neuronales. Estos modelos tratan de simular las propiedades de un sistema neuronal biológico, a través de modelos matemáticos. Cuando la neurona ha pasado un proceso de aprendizaje o entrenamiento, usando los valores históricos de las variables en el problema (p. ej. precio, demanda), ésta debe ser capaz de entregar la salida adecuada (pronóstico de precio) para unas señales de entrada dadas. En la literatura revisada se han utilizado los siguientes modelos de redes neuronales para predicción de precio:

- Red perceptrón multicapa (Wang y Ramsay, 1998; Szkuta *et al.*, 1999; Gao *et al.*, 2000; Zhang *et al.*, 2003; Rodríguez y Anders, 2004; Pino *et al.*, 2008)
- Modelo Neuro-Fuzzy (Hong y Hsiao, 2002; Rodríguez y Anders, 2004)
- Red de función de base radial Gausiana (Guo y Luh, 2003)

Otras técnicas de predicción

Otras técnicas utilizadas para la predicción de precio en mercados de electricidad son:

- Transformada wavelet (Kim *et al.*, 2002), también usada en conjunto con modelos Arima (Conejo *et al.*, 2005)
- Minería de datos (Lu *et al.*, 2005), empleada para predecir precios pico.

Otros métodos o técnicas

Métodos estocásticos (Lamont y Rajan, 1997; Song *et al.*, 1999 y 2000; Hao, 2000; Zhang *et al.*, 2000; Wen y David, 2001) y algoritmos genéticos (Richter y Sheblé, 1998) se han utilizado para determinar estrategias de ofertamiento, desde el punto de vista de

un solo generador. La teoría de control se ha apropiado para analizar el comportamiento de los agentes (Visudhiphan e Ilic, 1999).

En la Figura 1 se puede observar una clasificación de los modelos revisados, incluyendo año y autor de la primera y última referencia encontrada.

Los modelos analizados se han implementado también en diversas clases de mercado. Por lo tanto, con el fin de realizar una comparación entre ellos y poder determinar un patrón o guía de selección de la técnica más adecuada en un caso específico, a continuación se clasifican los modelos, desagregando las principales características en los mercados de electricidad.

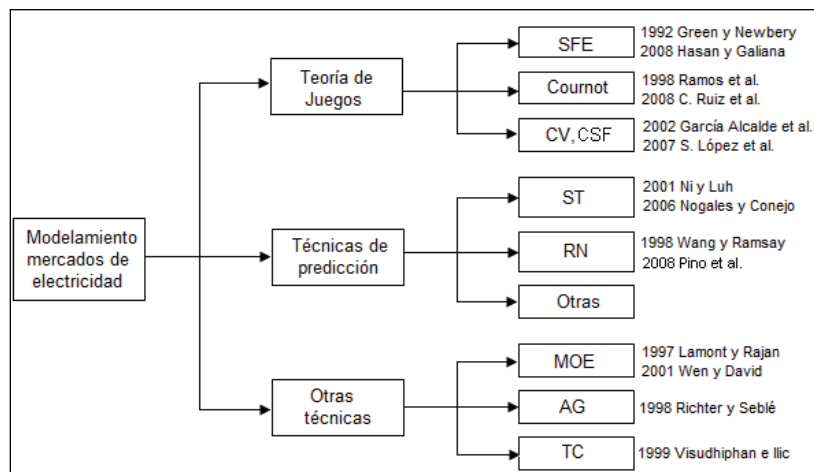


Figura 1. Modelamiento de mercados.

AG: Algoritmos genéticos. RN: redes neuronales. CSF: Función de suministro conjetural. SFE: Equilibrio de función de suministro. CV: Variación conjetural. ST: Series de tiempo. MOE: Método de optimización estocástica. TC: Teoría de control

Clasificación de los modelos

Entre las características más relevantes de los mercados de electricidad consideradas en su modelamiento, están:

Esquema de mercado

Los esquemas de mercado se pueden clasificar de varias formas, entre otras:

- Cantidad de oferentes: monopolio (uno), oligopolio (pocos) y competencia perfecta (muchos) (Bompard *et al.*, 2006)
- Tiempo de transacciones: mercados de corto plazo (diarios u horarios) y de largo plazo

Además, en mercados de corto plazo, también existen variadas estructuras: centralizado (*pool*), descentralizado (bilateral) e híbrido (Wu, 1995; David, A.K., 1998).

Objetivo de la formulación

Los mercados de electricidad pueden ser modelados desde distintos puntos de vista: operador o generador u oferente, buscando la maximización o minimización de una función objetivo. Estas funciones objetivos pueden ser: ingresos, beneficio social, costo del sistema, cambio de potencia para manejo de congestión, pago de consumidores.

Estructura de las ofertas

De acuerdo a las condiciones del mercado, los participantes pueden presentar sus ofertas al operador del mercado en dos formas: simple (precio y cantidad) y multipartes (función de costo) (Madrigal y Quintana, 2000)

Tipo de subasta

En los modelos analizados se identifican algunos de los tipos de subasta definidos por la teoría económica (Londoño, 2004). Teniendo en cuenta sólo las ofertas del generador, se considera una subasta de precio uniforme y, cuando se consideran además las del consumidor, subasta doble, ya sea de precio uniforme o discriminatorio. El precio uniforme se determina como el valor de oferta de la planta marginal y puede ser: para todo el sistema, por nodos, por zonas, o por áreas.

Restricciones de transmisión

Si se consideran o no las restricciones de la red de transmisión, se pueden encontrar dos modelos: nodo único y de redes de transmisión. Cuando se considera la red de transmisión, la gran mayoría de autores la ha representado por medio de modelos de red linealizados DC; sin embargo, también ha sido representada por modelos de red AC (Ferrero *et al.*, 1997; Weber y Overbye, 1999 y 2002) y por medio de redes de transbordo (Jing-Yuan y Smeers, 1999), donde no se considera la ley de Kirchhoff de voltaje.

Alcance del estudio

En este artículo los modelos usados para definir estrategias de ofertamiento en el mercado *spot* y para pronosticar precio se han considerado de corto plazo; los utilizados para análisis de poder o dominio de mercado (con o sin restricciones en la red) de mediano plazo y los modelos desarrollados para hacer programación de generación y análisis de la operación del mercado en el largo plazo han sido considerados en este horizonte de estudio.

Objetivo del estudio

En los modelos analizados se identificaron principalmente los siguientes objetivos de estudio: análisis de poder de mercado, impacto de restricciones de red, ofertamiento estratégico, pronóstico de precio y operación del mercado.

Análisis de los modelos utilizados

A continuación se presenta un análisis, con base en la bibliografía revisada, de los métodos que se han usado para modelar mercados de electricidad, considerando las características de los mercados en el modelo y el propósito para el cual han sido generados.

Teoría de juegos

En la Tabla 1 se resumen los modelos desarrollados con base en la teoría de juegos, con las principales características de los mercados. En cuanto a la estructura del mercado, se ha considerado bilateral (Hobbs, 2001; Day *et al.*, 2002) pero, en la mayoría de estos modelos, es de oligopolio, y en algunos casos, junto con competencia perfecta (Ferrero *et al.*, 1997; Otero Novas *et al.*, 2000). En casi todos los casos se considera la maximización de utilidad del generador, ya sea solo o junto con la maximización (minimización) del beneficio (costo) social, minimización del pago de consumidores o con la maximización de las utilidades de la

red; un caso especial (Peng y Tomsovic, 2003) considera una tercera función objetivo, que es la minimización del cambio de potencia por manejo de congestión. Por otro lado, también puede considerarse solamente la minimización de los costos del sistema (López de Haro *et al.*, 2007). La oferta multipartes se contempla en modelos de equilibrio de función de suministro o en modelos de función de suministro conjetural. La subasta considerada es de precio marginal, ya sea único en el sistema o nodal; y en algunos

casos, adicionalmente es doble (Weber y Overbye, 1999 y 2002; Bompard y Napoli, 2006). En general, estos modelos han sido utilizados para analizar el comportamiento estratégico de los participantes, y la gran mayoría tiene en cuenta las restricciones de la red, ya sea por modelos de red AC, DC o de trasbordo; pocos han sido usados para desarrollar estrategias de ofertamiento (Ferrero *et al.*, 1998) o pronosticar precio (García Alcalde *et al.*, 2002; López de Haro *et al.*, 2007).

Tabla 1. Modelos con teoría de juegos

Referencia	Tipo	Objetivo	Subasta	Red	Alcance	Aplicación	Prueba
(Green y Newbery, 1992)	SFE	Max. UG	PM	NU	Mediano	APM	Inglaterra & Gales
(Ferrero <i>et al.</i> , 1997)	SFE	Max. UG-BS	PMN	AC	Mediano	IRR	30 nodos
(Ferrero <i>et al.</i> , 1998)	SFE	Max. UG	PM	NU	Corto	EO	2 jugadores
(Ramos <i>et al.</i> , 1998)	Cournot	Max. UG Min. CS	PM	NU DC	Mediano	OM	18 Gen
(Wei y Smeers, 1999)	Cournot	Max. UG		Trans.	Largo	IRR	4 países Europa
(Weber y Overbye, 1999)	SFE	Max. UG-BS	PMN (Doble)	AC	Mediano	IRR	2 nodos
(Otero Novas <i>et al.</i> , 2000)	Cournot	Max. UG	PM	NU	Mediano	OM	España
(Hobbs <i>et al.</i> , 2000)	SFE	Max. UG-BS	PMN	DC	Mediano	IRR	30 nodos
(Hobbs, 2001)	Cournot	Max. UG-UR	PMN	DC	Mediano	IRR	3 nodos
(García Alcalde <i>et al.</i> , 2002)	CV	Max. UG	PM	NU	Largo	PP	España
(Weber y Overbye, 2002)	SFE	Max. UG-BS	PMN (Doble)	AC	Mediano	IRR	2 y 9 nodos
(Day <i>et al.</i> , 2002)	CSF	Max. UG-UR	PMN	DC	Mediano	IRR	Inglaterra y Gales
(Peng y Tomsovic, 2003)	Cournot	Max. UG-BS Min. MC	PM	DC	Mediano	IRR	IEEE 30 nodos
(Correia <i>et al.</i> , 2003)	SFE	Max. UG-BS	PMN	DC	Mediano	IRR	IEEE 30, 57 nodos
(De la Torre <i>et al.</i> , 2004)		Max. UG-BS	PM	DC	Mediano	IRR	SPC IEEE
(Xian <i>et al.</i> , 2004)	SFE	Max. UG-BS	PMN	DC	Mediano	IRR	IEEE 30 nodos
(Li y Shahidehpour, 2005)	SFE	Max. UG Min. PC	PMN	DC	Mediano	IRR	8 nodos
(Bompard <i>et al.</i> , 2006)	SFE	Max. UG-BS	PMN (Doble)	DC	Mediano	IRR	IEEE 30 nodos
(Bompard <i>et al.</i> , 2006)	Cournot SFE	Max. UG	PMN	DC	Mediano	IRR	IEEE 30 nodos
(Tong <i>et al.</i> , 2007)		Max. UG Min. CS	PMN	DC	Mediano	IRR	3 nodos
(López <i>et al.</i> , 2007)	CV	Min. CR	PM	NU	Mediano	PP	España
(Wang <i>et al.</i> , 2007)	Cournot SFE	Max. UG	PM	NU	Mediano	APM	3 firmas (30 Gen)
(Ruiz <i>et al.</i> , 2008)	Cournot	Max. UG	PM	NU	Mediano	APM	3 jugadores
(Hasan y Galiana, 2008)	SFE	Max. UG Min. CR	PM	NU	Mediano	APM	SPC IEEE

Generalmente, los modelos de función de suministro (SFE) son usados con el fin de representar, de una manera más real, los mercados donde los participantes presentan ofertas multipartes; sin embargo, por su estructura, se hace más complicado encontrar una solución y además, sólo bajo ciertas condiciones (Holmberg, 2008) se puede hallar un punto de equilibrio único, por lo tanto, no es utilizado en grandes sistemas. El modelo de Cournot facilita la determinación del punto de equilibrio, en comparación al de SFE, pero debe suponer que los participantes definen sus estrategias sólo en términos de cantidad. El modelo de función de suministro de conjetura (CSF), a diferencia del de Cournot, se puede utilizar cuando la elasticidad de la demanda es cero, es decir, cuando ésta no responde a los cambios de precio y, a diferencia del de SFE, se puede emplear en grandes sistemas (Day *et al.*, 2002).

Ventajas:

- Técnica muy apropiada para analizar comportamiento estratégico de agentes
- Se pueden incluir las restricciones de la red
- Puede usar diversos modelos de acuerdo a las características del mercado

Desventajas:

- No muy apropiada para desarrollar estrategias de ofertamiento o para pronóstico de precio

- Se debe considerar la información de todos los jugadores, ya sea precisa o aproximada
- El grado de complejidad matemática crece con el número de jugadores y estrategias

Técnicas de pronóstico

En la Tabla 2 se presentan los modelos que se han desarrollado para la predicción del precio en mercados de electricidad, los cuales se consideran de corto plazo. A excepción del elaborado para la predicción del precio pico (Lu *et al.*, 2005), estos modelos determinan el precio marginal del sistema, ya sea único o nodal. Se han implementado en mercados con variadas características sin necesidad de considerarlas explícitamente, debido a que las técnicas utilizadas se basan fundamentalmente en el análisis de datos históricos para establecer un patrón de comportamiento del precio. En series de tiempo se han utilizado varios modelos, y en redes neuronales la más utilizada ha sido la red perceptrón multicapa.

Ventajas:

- No se requiere considerar, de manera explícita, las interacciones de los agentes
- Se obtiene, de manera directa, un precio de referencia en bolsa

Desventajas:

- Se debe actualizar el modelo a medida que se tienen más datos disponibles
- Se requiere gran cantidad de datos históricos para obtener una buena predicción

Tabla 2. Técnicas de predicción

Autores	Tipo	Modelo	Oferta	Subasta	Prueba
(Wang y Ramsay, 1998)	RN	Perceptrón multicapa	Múltip.	PM	Inglaterra y Gales
(Szkuta et al., 1999)	RN	Perceptrón multicapa	Simple	PM	Victoria
(Gao et al., 2000)	RN	Perceptrón multicapa	Múltip.	PM (Doble)	California
(Ni y Luh, 2001)	ST	CB+AR			Nueva Inglaterra
(Nogales et al., 2002)	ST	RD, FT	Simple	PM (Doble)	California, España
(Hong y Hsiao, 2002)	RN+LF			PMN	PJM
(Kim et al., 2002)	WL		Múltip.	PM	Inglaterra y Gales
(Zhang et al., 2003)	RN	Perceptrón multicapa		PM	Nueva Inglaterra
(Guo y Luh, 2003)	RN	Base radial Gaussiana		PM	Nueva Inglaterra
(Contreras et al., 2003)	ST	Arima			California, España
(Crespo et al., 2004)	ST	AR, CNO, Arma		PM (Doble)	Leipzig
(Rodríguez y Anders, 2004)	RN+LF		Simple	PM (Doble)	Ontario
(Lu et al., 2005)	MD				Queensland
(García et al., 2005)	ST	GARCH			California, España
(Conejo et al., 2005)	WL+ARIMA				España
(Nogales y Conejo, 2006)	ST	FT			PJM
(Pino et al., 2008)	RN	Perceptrón multicapa			España

Nomenclatura

- APM: Análisis de poder de mercado
 Min. CR: Minimización de costo del sistema
 AR: Auto Regresivo
 Min. CS: Minimización del costo social
 Arima: Autorregresivo integrado promedios móviles
 Min. MC: Minimización de cambio de potencia para manejo de congestión
 Arma: Autorregresivo con promedios móviles
 Min. PC: Minimización pagos de consumidores
 CB: Clasificador bayesiano
 NU: Nodo único
 CNO: Componentes no observadas
 OM: Operación de mercado
 CSF: Función de suministro conjetural
 PM: Precio marginal
 CV: Variación conjetural
 PMN: Precio marginal nodal
 EO: Estrategias de ofertamiento
 PP: Pronóstico de precio
 FT: Función de transferencia
 RD: Regresión dinámica
 GARCH: Heteroskedastic condicional autorregresivo generalizado
 RN: Redes neuronales
 IRR: Impacto restricciones de red

- SFE: Equilibrio función de suministro
 LF: Lógica Fuzzy
 SPC: Sistema de prueba de confiabilidad
 Max. BS: Maximización beneficio social
 ST: Series de tiempo
 Max. UG: Maximización utilidades del generador
 TC: Teoría de control
 Max. UR: Maximización utilidades de la red
 Trans.: Red de transbordo
 MD: Minería de datos
 WL: Wavelet

Conclusiones

Debido a la gran cantidad de información encontrada alrededor del tema de los mercados de electricidad, se realizó una clasificación y selección de los artículos encontrados, teniendo en cuenta su factor de impacto en el tema. Luego, con el fin de comparar los modelos, se escogieron características del mercado que permitirían identificarlos o asociarlos (esquema de mercado, estructura de las ofertas, tipo de subasta, entre otras).

Se pudo evidenciar que existen técnicas que pueden ser aplicadas de manera satisfactoria en el análisis de mercados de electricidad y también en el apoyo en la toma de decisiones en él. En mercados competitivos, se identificaron principalmente la teoría de juegos y las técnicas de predicción. El uso de una técnica en particular depende de factores tales como: información disponible, objetivo del estudio, tipo de mercado, entre otros.

De las características del modelo tenidas en cuenta en este análisis, y de acuerdo con la clasificación de las técnicas presentadas, se puede decir que el objetivo y alcance del estudio son las características que más influencia tienen en la determinación de la técnica a utilizar.

De la revisión bibliográfica hecha se puede concluir que la teoría de juegos ha sido utilizada satisfactoriamente en el análisis del comportamiento estratégico en el mediano plazo en mercados de electricidad con estructura de oligopolio. Por otra parte, técnicas de pronóstico tales como series de tiempo y redes neuronales han exhibido, en general, muy buenos resultados en la determinación de precios en la bolsa de energía en el corto plazo.

Entre los modelos de teoría de juegos se han utilizado principalmente el modelo de equilibrio de función de suministro y el modelo de Cournot, es este caso la selección es un compromiso o un balance entre complejidad y precisión. El modelo de función de suministro se ajusta más al modelo real de mercado, donde los participantes determinan sus ofertas considerando precio y cantidad; sin embargo, esta consideración hace que la complejidad matemática del modelo crezca considerablemente, haciendo más difícil su aplicación en grandes sistemas. Por otra parte, el modelo de Cournot es sencillo y fácil de implementar en grandes sistemas, pero la determinación de estrategias de los participantes se efectúa sólo en términos de cantidad.

De las técnicas de pronóstico las que más se han utilizado son las redes neuronales y, de éstas, la perceptrón multicapa ha sido la más aplicada para la definición de precio.

En este artículo se presentan también dos tablas con las principales técnicas identificadas, en las cuales se pueden reconocer las características del mercado que se han tenido en cuenta en cada uno de los modelos, así como el alcance y objetivo de estudio, y el mercado de aplicación.

Los resultados de este estudio pueden ser utilizados como punto de partida para futuras investigaciones, por ejemplo en la aplicación de nuevas técnicas a un objetivo de estudio determinado, la consideración de una característica del mercado que no se haya tenido en cuenta en las técnicas ya aplicadas, o simplemente como referencia inicial de un tema más específico entre los tratados aquí.

Bibliografía

- Arango, S., Dyrer, I., Larsen, E. R., Lessons from deregulation: Understanding electricity markets in South America., *Utilities Policy*, Vol. 14, No. 3, Sep. 2006, pp. 196-207.
- Barquín, J., Vázquez, M., Cournot equilibrium calculation in power networks: an optimization in approach with price response computation., *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 23, No. 2, May., 2008, pp. 317-326.
- Bompard, E., Lu, W., Napoli, R., Network constraint impacts on the competitive electricity markets under supply-side strategic bidding., *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 21, No. 1, Feb., 2006, pp. 160-170.
- Bompard, E., Ma, Y., Ragazzi, E., Micro-economic analysis of the physical constrained markets: game theory application to competitive electricity markets., 2006. Disponible en <http://www.hermesricerche.it/>
- Conejo, A.J., Contreras, J., Espínola, R., Plazas, M. A., Forecasting electricity prices for a day-ahead pool-based electric energy market., *International Journal of Forecasting*, Vol. 21, No. 3, Jul-Sep. 2005, pp. 435-462.
- Conejo, A. J., Plazas, M. A., Espínola, R., Molina, A. B., Day-Ahead electricity price forecasting using the wavelet transform and ARIMA models., *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, No. 2, May., 2005, pp. 1035-1042.
- Contreras, J., Espínola, R., Nogales, F. ., Conejo, A. J., ARIMA Models to predict next-day electricity prices., *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 18, No. 3, Aug., 2003, pp. 1014-1020.
- Correia, P. F., Overbye, T. J., Hiskens, I. A., Searching for noncooperative equilibria in centralized electricity markets., *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 18, No. 4, Nov., 2003, pp. 1417-1424.
- Crespo Cuaresma, J., Hlouskova, J., Kossmeier, S., Obersteiner, M., Forecasting electricity spot-prices using linear univariate time-series models., *Applied Energy*, Vol. 77, No. 1, Jan., 2004, pp. 87-106.
- David, A. K., Dispatch methodologies for open access transmission systems., *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 13, No. 1, Feb. 1998, pp. 46-53.
- David, A. K., Wen, F., Strategic bidding in competitive electricity markets: a literature survey., *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Seattle, WA, USA, 2000, Vol 4, pp. 2168-2173.
- Day, C. J., Hobbs, B. F., Pang, J.-S., Oligopolistic competition in power networks: a conjectured supply function approach., *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 17, No. 3, Aug., 2002, pp. 597-607.
- De la Torre, S., Conejo, A. J., Contreras, J., Finding multiperiod Nash equilibria in pool-based electricity markets., *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 19, No. 1, Feb., 2004, pp. 643-65.
- Ferrero, R. W., Rivera, J. F., Shahidehpour, M., Application of games with incomplete information for pricing electricity in deregulated power pools., *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 13, No. 1, Feb., 1998, pp. 184-189.
- Ferrero, R. W., Shahidehpour, M., Ramesh, V. C., Transaction analysis in deregulated power systems using game theory., *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 12, No. 3, Aug., 1997, pp. 1340-1347.
- Gao, F., Guan, X., Cao, X. R., Papalexopoulos, A., Forecasting power market clearing price and quantity using a neural network method., *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Vol. 4, 2000, pp. 2183-2188.
- García Alcalde, A., Ventosa, M., Rivier, M., Ramos, A., Relación, G., Fitting electricity market models. A conjectural variations approach., 14th PSCC, Sevilla, Session 12, Paper 3, 24-28 June 2002.
- García, R. C., Contreras, J., Van Akkeren, M., Garcia, J. B. C., A GARCH Forecasting model to predict day-ahead electricity prices., *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, No. 2, May., 2005, pp. 867-874.
- Green, R. J., Newbery D. M., Competition in the British electricity spot market., *The Journal of Political Economy*, Vol. 100, No. 5, Oct., 1992, pp. 929-953.
- Guo, J.-J, Luh, P.,B., Selecting input factors for clusters of Gaussian radial basis function networks to improve market clearing price prediction., *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 18, No. 2, May., 2003, pp. 665-672.
- Hao, S., A study of basic bidding strategy in clearing pricing auctions., *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 15, No. 3, Aug., 2000, pp. 975-980.
- Hasan, E., Galiana, F. D., Conejo, A. J., Electricity markets cleared by merit order-Part I: finding the market outcomes supported by pure strategy nash equilibria., *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 23, No. 2, May., 2008, pp. 361-371.
- Hasan, E., Galiana, F. D., Electricity markets cleared by merit order-Part II: strategic offers and market power., *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 23, No. 2, May., 2008, pp. 372-379.
- Hobbs, B. F., Linear complementary models of Nash-Cournot competition in bilateral and POOLCO power markets., *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 16, No. 2, May., 2001, pp. 194-202.
- Hobbs, B. F., Metzler, C. B., Pang, J.-S., Strategic gaming analysis for electric power systems: An MPEC approach., *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 15, No. 2, May., 2000, pp. 638-645.
- Holmberg, P., Unique supply function equilibrium with capacity constraints., *Energy Economics*, Vol.30, No.1, Jan., 2008, pp. 148-172.
- Hong, Y.-Y., Hsiao, C.-Y., Locational marginal price forecasting in deregulated electricity markets using artificial intelligence., *IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 149, No. 5, Sep., 2002, pp. 621-626.
- Jing-Yuan, W., Smeers, Y., Spatial oligopolistic electricity models with cournot generators and regulated transmission prices., *Operations Research*, Vol. 47, No. 1, Jan. - Feb., 1999, pp. 102-112.
- Kim, C., Yu, I.-K., Song, Y. H., Prediction of system marginal price of electricity using wavelet transform analysis., *Energy Conversion and Management*, Vol. 43, No. 14, Sep., 2002, pp. 1839-1851.
- Klemperer, P. D., Meyer, M. A., Supply function equilibria in oligopoly under uncertainty., *Econometrica*, Vol. 57, No. 6, Nov., 1989, pp. 1243-1277.

- Lamont, J.W., Rajan, S., Strategic bidding in an energy brokerage., *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 12, No. 4, Nov., 1997, pp. 1729-1733.
- Li, G., Liu, C.-C., Lawarrée, J., Gallanti, M., Venturini, A., State-of-the-art of electricity price forecasting., *International Symposium CIGRE/IEEE PES*, 2005, pp. 110-119.
- Li, T., Shahidehpour, M., Strategic bidding of transmission-constrained GENCOs with incomplete information., *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, No. 1, Feb., 2005, pp. 437-447.
- Londoño, S., Desarrollo de un modelo para el análisis del mercado de electricidad Colombiano., tesis presentada a la Universidad del Valle, Cali-Colombia, para optar al grado de Master en Ingeniería, 2004.
- López de Haro, S., Sánchez Martín, P., De la Hoz Ardiz, J. E., Fernández Caro, J., Estimating conjectural variations for electricity market models., *European Journal of Operational Research*, Vol. 181, No. 3, Sep., 2007, pp. 1322-1338.
- Lu, X., Dong, Z. Y., Li, X., Electricity market price spike forecast with data mining techniques., *Electric Power Systems Research*, Vol. 73, No. 1, Jan., 2005, pp. 19-29.
- Madrigal, M., Quintana, V. H., Using optimization models and techniques to implement electricity auctions., *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, Vol. 2, Jan. 2000, pp. 897-902.
- Nash, J. F., Non-cooperative games., *The Annals of Mathematics*, 2nd Ser., Vol. 54, No. 2, Sep., 1951, pp. 286-295.
- Ni, E., Luh, P. B., Forecasting power market clearing price and its discrete PDF using a Bayesian-based classification method., *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, Columbus, OH, USA, Vol. 3, 2001, pp. 1518-1523.
- Nogales, F. J., Conejo, A. J., Electricity price forecasting through transfer function models., *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 57, No. 4, Apr., 2006, pp. 350-356.
- Nogales, F. J., Contreras, J., Conejo, A. J., Espínola, R., Forecasting next-day electricity prices by time series models., *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 17, No. 2, May., 2002, pp. 342-348.
- Otero Novas, I., Meseguer, C., Batle, C., Alba, J. J., A simulation model for a competitive generation market., *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 15, No. 1, Feb., 2000, pp. 250-256.
- Peng, T., Tomsovic, K., Congestion influence on bidding strategies in an electricity market., *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 18, No. 3, Aug., 2003, pp. 1054-1061.
- Philipson, L., Willis, H. L., *Understanding Electric Utilities and De-Regulation.*, Second Edition, Taylor & Francis Group (ed.), Boca Raton, London, New York, 2006.
- Pino, R., Parreno, J., Gómez, A., Priore, P., Forecasting next-day price of electricity in the Spanish energy market using artificial neural networks., *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 21, No. 1, Feb., 2008, pp. 53-62.
- Ramos, A., Ventosa, M., Rivier, M., Modeling competition in electric energy markets by equilibrium constraints., *Utilities Policy* Vol. 7, No. 4, Feb., 1998, pp. 233-242.
- Richter, C. W., Sheblé, G. B., Genetic algorithm evolution of utility bidding strategies for the competitive marketplace., *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 13, No. 1, Feb., 1998, pp. 256-261.
- Rodriguez, C. P., Anders, G. J., Energy price forecasting in the Ontario competitive power system market., *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 19, No. 1, Feb., 2004, pp. 366-374.
- Rudnick, H., Latin American deregulation processes / Latin American Experience., *IEEE Power Engineering Review*, Vol. 18, No. 12, December 1998, pp. 10-12
- Ruiz, C., Conejo, A.J., García-Bertrand, R., Some analytical results pertaining to Cournot models for short-term electricity markets., *Electric Power Systems Research*, Vol. 78, No. 10, Oct., 2008, pp. 1672-1678.
- Song, H., Liu, C.-C., Lawarrée, J., Dahlgren, R. W., Optimal electricity supply bidding by Markov decision process., *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 15, No. 2, May., 2000, pp. 618-624.
- Song, H., Liu, C.-C., Lawarrée, J., Decision making of an electricity supplier's bid in a spot market., *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Edmonton, Alta, Canada, Vol. 2, 1999, pp. 692-696.
- Szkuta, B. R., Sanabria, L. A., Dillon, T. S., Electricity price short-term forecasting using artificial neural networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14, No. 3, Aug., 1999, pp. 851-857.
- Tong, X., Wang, J., Yang, H., Deng, X., A dynamic bidding model of power markets involving transmission constraints and bidding bounded constraints., *IEEE Power Engineering Society General Meeting (PES GM 2007)*, Tampa, Florida USA, 24-28 June 2007.
- Ventosa, M., Baillo, Á., Ramos, A., Rivier, M., Electricity market modeling trends., *Energy Policy*, Vol. 33, No. 7, May., 2005, pp. 897-913.
- Visudhiphan, P., Ilic, M. D., Dynamic games-based modeling of electricity markets., *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, New York, USA, Vol. 1, 1999, pp. 274-281.
- Wang, A. J., Ramsay, B., A neural network based estimator for electricity spot-pricing with particular reference to weekend and public holidays., *Neurocomputing*, Vol. 23, No. 1-3, Dec., 1998, pp. 47-57.
- Wang, L., Mazumdar, M., Bailey, M. D., Valenzuela, J., Oligopoly models for market price of electricity under demand uncertainty and unit reliability., *European Journal of Operational Research*, Vol. 181, No. 3, Sep., 2007, pp. 1309-1321.
- Weber, J. D., Overbye, T. J., A two-level optimization problem for analysis of market bidding strategies., *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Edmonton, Canada, Vol. 2, 1999, pp. 682-687.
- Weber, J. D., Overbye, T. J., An individual welfare maximization algorithm for electricity markets., *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 17, No. 3, Aug., 2002, pp. 590-596.
- Wen, F., David, A. K., Optimal bidding strategies and modeling of imperfect information among competitive generators., *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 16, No. 1, Feb., 2001, pp. 15-21.
- Wu, F. F., Varaiya, P., Coordinated multilateral trades for electric power networks: Theory and Implementation., Working papers series of the Program on Workable Energy Regulation (POWER), University of California Energy Institute, PWP-031, June 1995.
- Xian, W., Yuzeng, L., Shaohua, Z., Oligopolistic equilibrium analysis for electricity markets: a nonlinear complementarity approach., *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 19, No. 3, Aug., 2004, pp. 1348-1355.
- Zhang, D., Wang, Y., Luh, P. B., Optimization based bidding strategies in the deregulated market., *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 15, No. 3, Aug., 2000, pp. 981-986.
- Zhang, L., Luh, P. B., Kasiviswanathan, K., Energy clearing price prediction and confidence interval estimation with cascaded neural networks., *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 18, No. 1, Feb., 2003, pp. 99-105.