

Pronóstico de Precio en el Mercado de Electricidad Colombiano usando Redes Neuronales



RESUMEN

En este artículo se presenta el desarrollo e implementación de un modelo para realizar el pronóstico diario de precio en bolsa del mercado de electricidad Colombiano utilizando redes neuronales. Con información obtenida de la base de datos del Mercado de Energía Mayorista (MEM), se diseñó una red neuronal para cada uno de los agentes generadores que más influencia tienen sobre el mercado; estas redes fueron entrenadas utilizando los valores de precio de oferta y precio en bolsa correspondientes al año 2002. La validación del modelo se realizó empleando la misma información para el año 2003, obteniendo unos resultados de precisión en promedio del 7%. Este método de redes neuronales utilizado para el modelamiento de cada uno de los agentes generadores, no se ha utilizado para implementar modelos de este tipo en investigaciones científicas, de acuerdo a la revisión bibliográfica.

Sandra M. Londoño, M.Sc.

Ingeniera Departamento de Estudios Gers S.A. Cali, Colombia

Carlos A. Lozano, Ph.D.

Profesor Asociado Universidad del Valle Cali, Colombia.

Gladys Caicedo, Ph.D.

Profesora Titular Universidad del Valle Cali, Colombia

*Grupo de Investigación Gralta.
gralta@univalle.edu.co*

PALABRAS CLAVES

Bolsa de energía, mercado desregulado, redes neuronales

ABSTRACT

In this paper, the development and implementation of a model for forecasting spot price of the Colombian electricity market using neuronal networks is presented. With information obtained from the data base of the Colombian Wholesale Energy Market (MEM), a neuronal network for each one of the generation agents that have more influence on the market was designed; these networks were trained with the values of year 2002 and they were validated with the data of year 2003, obtaining results on the average around 7% of accuracy. The neuronal networks method, used to model each one of the generation agents, has not been used to implement models of this type in scientific researches, according to the bibliographical revision.

KEYWORDS

Pool, deregulated market, neuronal networks.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los mercados de electricidad alrededor del mundo han evolucionado de un sistema verticalmente integrado a un sistema desregulado, el cual presenta la libre competencia entre todos sus agentes. Para que exista una competencia efectiva en un mercado competitivo, es necesario que los agentes oferentes cuenten con herramientas que les permitan definir sus estrategias de oferta y que los entes reguladores puedan realizar análisis de la eficiencia del mercado. Colombia no ha sido la excepción a esta evolución y por esta razón es importante que sus agentes generadores y reguladores posean herramientas para analizar el comportamiento de los precios en bolsa en el mercado. Este artículo presenta el desarrollo e implementación de una herramienta computacional con la estructura y características del mercado colombiano que permite realizar pronóstico de precio diariamente. En esta herramienta, se utilizó redes neuronales, para modelar los agentes generadores del mercado mayorista colombiano que más influencia tienen en la definición del precio en bolsa.

2. MODELO PARA PRONÓSTICO DE PRECIO

Existen muchas variables que pueden tener influencia en el modelo que permite realizar pronóstico de precio en un mercado de electricidad desregulado. En la Figura 1 se presentan algunas de las señales de entradas y salidas presentes en

la definición del precio en bolsa en un mercado competitivo.

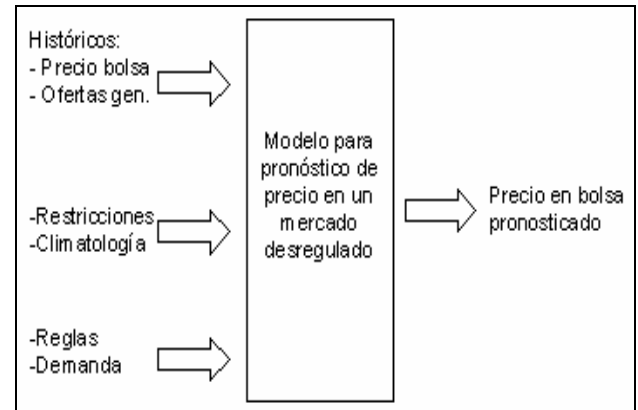


Figura 1. Entradas y salidas, modelo de pronóstico de precio mercado de electricidad desregulado.

Pronosticar el precio en un mercado de electricidad desregulado es un problema complejo debido a:

- (a) **Número de Agentes.** Se deben modelar todos los agentes generadores en forma independiente, debido a que las estrategias de oferta varían con la percepción que tenga cada uno del mercado. En consecuencia, se hace necesario manejar una gran cantidad de modelos.
- (b) **Número de Variables.** Para cada uno de los modelos de los agentes, se deben considerar las variables que afectan las estrategias de oferta, estas son: condiciones ambientales, restricciones de red, políticas económicas, entre otras. La manera como cada agente maneja todas las variables que afectan el modelo, depende de su experiencia, destreza y percepción del mercado, características que son difíciles de cuantificar y representar por medio de simples ecuaciones.
- (c) **Externalidades.** El modelo del mercado también involucra gran cantidad de variables: condiciones climatológicas, fuente de energía predominante en el sistema (hidrológica, térmica, otras fuentes), método de subasta implementado, reglas del mercado y demanda del sistema. Por esta razón, la energía, tiene valores diferentes de acuerdo al periodo de tiempo en el que se esté realizando el oferta, afectando también el modelo de los agentes.

3. MODELO PARA PRONÓSTICO DE PRECIO APLICADO A COLOMBIA

El modelo para pronóstico de precio se obtuvo del análisis de la información del mercado mayorista colombiano, correspondiente al año 2002. En este estudio se involucraron las siguientes variables:

Periodos de tiempo diarios, mensuales y horarios: Demanda comercial, Generación ideal y precio en bolsa.

Periodos de tiempo diarios y mensuales: Aportes de ríos medios históricos, aportes ríos (volumen), aportes ríos (energía).

Periodos de tiempo horarios: Disponibilidad comercial y precio de oferta.

Con los resultados del análisis de estas variables y para simplificar el modelo de los agentes generadores y del mercado, se hicieron las siguientes consideraciones en este estudio:

- Para reducir el número de agentes generadores modelados, se seleccionaron los que más influencia tienen en la definición del precio en el mercado.
- Con el objetivo de reducir las variables climatológicas, los agentes seleccionados fueron divididos en varios grupos de acuerdo a la región, garantizando de esta manera las mismas condiciones por grupo.
- Las plantas inflexibles no fueron modeladas, sólo se consideró la potencia que suministran a la red como potencia base dentro del modelo para cubrir la demanda.
- La demanda se consideró en cuatro **tipos de día**: Día laboral, día sábado, día domingo y día festivo.

Se decidió utilizar una red neuronal para modelar el problema debido a que se pueden incluir variables que son difíciles de cuantificar por medio de simples ecuaciones, lo cual permite tener en cuenta las incertidumbres del mercado.

4. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

En la Figura 2, se presenta el diagrama esquemático del modelo de pronóstico de precio implementado en Matlab.

Las ofertas de los generadores y el precio en bolsa promedio del día anterior alimentan cada una de las redes neuronales que representan los agentes generadores simulados del mercado de energía mayorista colombiano. Las señales de salida de las redes neuronales, que corresponden a las ofertas pronosticadas de los agentes generadores, son utilizadas en conjunto con la demanda en el tipo de día anterior para alimentar la función implementada que posee la estructura de cálculo de precio en el mercado colombiano. Finalmente, la señal de salida del modelo corresponde al precio en bolsa pronosticado para el siguiente día.

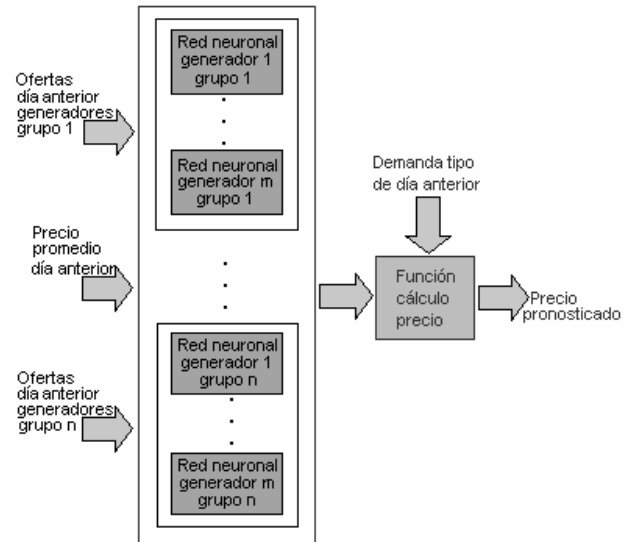


Figura 2. Diagrama esquemático modelo pronóstico de precio

La metodología utilizada para la implementación del modelo fue la siguiente:

a. Selección de agentes generadores

Para las centrales flexibles de generación, se calculó el número de veces que estuvieron en mérito durante el año 2002 (de acuerdo a la referencia [1]), se obtuvo el porcentaje de participación en bolsa para cada una de ellas en ese año y se consideraron las que tenían un porcentaje de participación mayor o igual a 20%.

b. Diseño de las redes neuronales

Para cada uno de los generadores seleccionados se diseñó una red neuronal con el toolbox de Matlab; esta herramienta requiere para el diseño de la red: vector de entrada, vector objetivo, y los parámetros de la red neuronal (tipo de red, función de entrenamiento, número de capas, número de neuronas y función de transferencia por capa). El

vector de entrada para la red neuronal de cada uno de los generadores modelados está compuesto por el precio promedio del sistema y por las ofertas de los generadores que pertenecen al mismo grupo en el día anterior al pronóstico. El vector objetivo corresponde a la oferta en el día siguiente del generador que está siendo modelado. Los parámetros principales de la red neuronal fueron definidos realizando múltiples pruebas y determinando con cuales de ellos la red se adaptaba mejor al comportamiento de los generadores.

c. Entrenamiento de las redes neuronales

Las redes diseñadas para cada uno de los agentes generadores fueron entrenadas utilizando los datos reales del mercado en el año 2002. Para manejar la gran cantidad de datos, los vectores de entrada y vectores objetivo totales del año 2002 para cada uno de los agentes generadores, fueron divididos en varios grupos de vectores. Con cada vector de entrada y el vector objetivo correspondiente se realizó un entrenamiento progresivo de la red.

d. Validación del modelo

Los resultados de cada una de las redes y la demanda alimentan una función implementada para el cálculo del precio en bolsa, que es el resultado que finalmente entrega el modelo. Los resultados entregados por el modelo fueron validados con datos reales del año 2003.

5. RESULTADOS

Con las redes de los agentes generadores entrenadas, se utilizó la herramienta para realizar pronóstico de precio diario en bolsa en el año 2003. Con el fin de determinar si los valores obtenidos con la herramienta se acercaban a la realidad, se simularon 336 casos y los resultados obtenidos fueron comparados con los reales.

En la Tabla 1 se presentan los porcentajes de error por tipo de día para los casos simulados, en donde se puede observar que se tienen muy buenos resultados para el tipo de día laboral.

Tabla 1. Porcentajes de error del precio en el mercado por tipo de día

Tipo de día	# de datos	%de error
Día laboral	216	6.32%
Sábado	48	8.19%
Domingo	48	9.56%
Festivo	24	9.22%
Total	336	7.26%

En la Tabla 2 se muestran los resultados y los porcentajes de error para algunas de las simulaciones realizadas.

En la Figura 3 se muestran los resultados para todos los casos simulados, en donde se puede observar la comparación entre los resultados del modelo y los valores reales del mercado mayorista. El porcentaje de error promedio para todas las simulaciones realizadas fue de 7%, un resultado muy bueno para tomarlo como referencia en la definición de estrategias de oferta e ilustración de la eficiencia del mercado.

Tabla 2. Porcentajes de error para la simulación de pronóstico de precio

Respuesta	Bolsa real	% de error
52.98	54.15	2.21%
52.76	53.15	0.74%
41.03	40.15	2.14%
44.24	44.15	0.20%
53.21	53.65	0.83%
50.13	49.15	1.95%
49.91	49.15	1.52%
50.27	50.15	0.24%
50.92	50.15	1.51%
55.89	53.65	4.01%
52.13	53.15	1.96%
43	43.65	1.51%
48.7	50.15	2.98%
51.89	53.15	2.43%
51.94	53.15	2.33%
47.04	46.15	1.89%
53.04	52.15	1.68%
55.88	55.35	0.95%
54.59	56.15	2.86%
53.6	53.15	0.84%
55.76	57.15	2.49%
52.7	52.65	0.09%
52.7	53.05	0.66%
53.47	53.15	0.60%
53.47	52.65	1.53%
48.14	49.55	2.93%
48.79	49.55	1.56%
48.79	50.15	2.79%
53.85	53.15	1.30%
48.19	49.15	1.99%
53.67	54.15	0.89%
53.63	54.15	0.97%

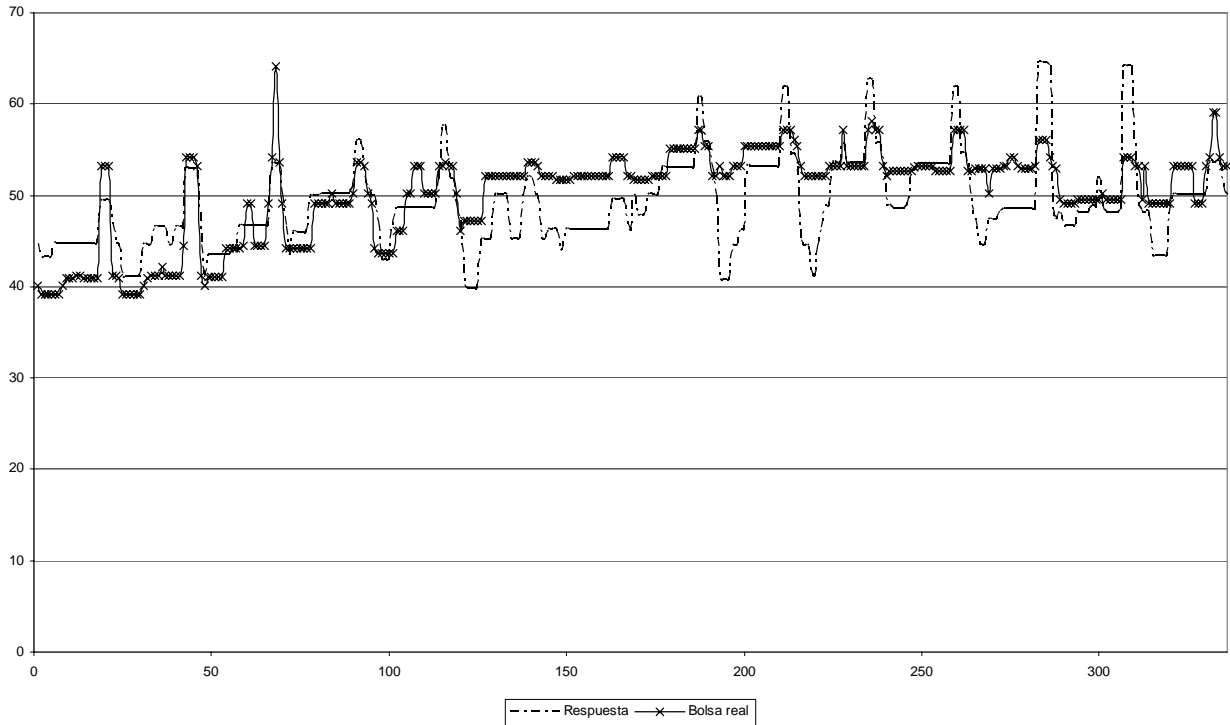


Figura 3. Comparación entre resultados del modelo para pronóstico de precio en bolsa y valores reales

6. CONCLUSIONES Y APORTES

Se desarrolló e implementó una herramienta para realizar pronóstico de precio diario (corto plazo) en bolsa en el mercado de electricidad Colombiano.

Para el modelo de pronóstico de precio presentado en esta investigación, se utilizan las redes neuronales, que no han sido utilizadas para implementar modelos en mercados de electricidad, de acuerdo a la revisión bibliográfica realizada. Este método permite tener en cuenta las incertidumbres y las ambigüedades presentes en el mercado.

Los agentes generadores pertenecientes al mercado de electricidad Colombiano que se incluyeron en el modelo, fueron modelados en forma independiente, lo que proporciona flexibilidad al modelo permitiendo incluir más agentes generadores al mismo.

La herramienta de pronóstico de precio se validó con los datos reales de precio en bolsa en el mercado Colombiano para un total de 336 casos, obteniendo muy buenos resultados de precisión, considerando el pronóstico del día siguiente.

La herramienta desarrollada presenta dificultades cuando los precios de oferta de los agentes generadores son extremadamente altos, esto se puede solucionar perfeccionando la red neuronal de cada uno de los agentes generadores, o bien, que cuando se presenten este tipo de datos que no representan un comportamiento razonable del generador no se tengan en cuenta en el modelo.

La herramienta utiliza datos históricos de la demanda para realizar pronóstico de precio, puede ser complementada incluyendo un modelo para pronóstico de demanda.

Las transacciones internacionales de electricidad (TIE) no fueron modeladas. Teniendo los datos suficientes para el entrenamiento de las redes, esta variable puede ser incluida en el modelo.

Los resultados de la herramienta pueden ser utilizados como referencia en la definición de estrategias de oferta de los generadores y en el análisis de la eficiencia del mercado.

Una proyección del pronóstico de precio a corto plazo puede ser utilizada para prever la evolución de los precios en bolsa y tener una referencia en la definición de los contratos a largo plazo.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Base de datos Neón, Mercado de Energía Mayorista
- [2] S. Londoño. "Desarrollo de un modelo para el análisis del mercado de electricidad Colombiano", tesis de grado, maestría en sistemas de generación de energía eléctrica, Universidad del Valle, Cali 2004.
- [4] A. David. "Dispatch methodologies for open access transmission systems", IEEE Transactions on power systems, vol. 13, No. 1, February 1998.
- [6] P. Kleindorfer, D. Wu, Ch. Fernando. "Strategic gaming in electric power markets", Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences, January 4 – 7, 2000.
- [7] G. Gross, D. Finlay. "Generation supply bidding in perfectly competitive electricity markets", Computational & Mathematical Organization Theory 6, 83-98, 2000.
- [8] D. Lane, C. Richter, G. Sheblé. "Modeling and evaluating electricity options markets with intelligent agents", International conference on Electric Utility, deregulation and restructuring and power technologies 2000, Londres, April 2000
- [9] D. Lane, A. Kroujiline, V. Petrov, G. Sheblé. "Electricity market power: marginal cost and relative capacity effects", proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation, July 2000.
- [10] M. Madrigal, V. Quintana. "Using optimization models and techniques to implement electricity auctions", Enginnering Society Winter Meeting, 2000. IEEE.
- [11] A. Kian, A. Keyhani. "Stochastic Price Modeling of Electricity in Deregulated Energy Markets", IEEE Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences, 2001
- [12] J-B Park, B. Kim, J. Kim, M. Jung, J-K Park. "A continuous strategy game for power transactions analysis in competitive electricity markets", IEEE Transaction on Power Systems, Vol 16, No. 4, November 2001.
- [13] C. Skoulidas, C. Vournas, G. Papavassilopoulos. "Adaptive game modeling of deregulated power markets", IEEE Power Engineering Review, pag. 42 – 45, September 2002.
- [14] A. Conejo, F. Galiana, J. Arroyo, R. García, Ch. Wei, M. Huneault. "Economic inefficiencies and cross-subsidies in an auction-based electricity pool", IEEE Transactions on power systems, vol. 18, No. 1; February 2003.
- [15] G. Gajjar, S. Khaparde, P. Nagaraju, S. Soman. "Application of actor-critic learning algorithm for optimal bidding problem of a genco", IEEE Transactions on power systems, vol. 18, No. 1, February 2003.
- [16] Y. He, Y. Song. "Analysis of auction mechanism in electricity generation markets by two-level optimisation model".
- [17] C. Richter, G. Sheblé. "Building fuzzy bidding strategies for the competitive generator", presented at the North American Power Symposium at Laramie, WY in 1997

AUTORES



Londoño H Sandra M: Ingeniera Electricista de la Universidad del Valle. Asistente de Investigación y Docencia de la Universidad del Valle. Estudiante de la Maestría en Sistemas de Generación de Energía Eléctrica. Sus áreas de interés comprenden la desregulación del mercado eléctrico y su modelamiento.

E-mail: sml@uniweb.net.co



Lozano Carlos A: Ingeniero Electricista y M.Sc en Ingeniería Eléctrica de la Universidad del Valle. Ph.D de la Universidad de Strathclyde Glasgow Escocia. Profesor asociado de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Sus áreas de interés comprenden la desregulación del

mercado eléctrico, técnicas de optimización aplicada y modelamiento de sistemas de potencia.

E-mail: clozano@univalle.edu.co



Delgado C Gladys: Ingeniera Electricista, M.Sc en Sistemas de Generación de Energía Eléctrica y Ph.D. en Ingeniería con énfasis en ingeniería eléctrica de la Universidad del Valle. Profesora titular de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle. Su área de interés comprende la

automatización en sistemas de distribución.

E-mail: glacadel@univalle.edu.co