

Estabilidad del precio en el mercado de electricidad colombiano*

Sandra M. Londoño H.** , (*) Carlos A. Lozano***,
(*) Gladys Caicedo Delgado****

Resumen

En este artículo, se presenta el desarrollo e implementación de un modelo que permite analizar la operación del mercado de electricidad colombiano, utilizando ecuaciones integro/diferenciales. Los parámetros del modelo de la función de costo, en cada uno de los agentes generadores, fueron obtenidos de la base de datos del Mercado de Energía Mayorista (MEM) para los generadores con mayor influencia en la bolsa. Obtenidas las funciones de costo, se realizaron simulaciones para analizar la estabilidad del precio en la bolsa del mercado, considerando las restricciones operativas de los generadores, las cuales, de acuerdo con la literatura revisada, no han sido involucradas en otras investigaciones para este propósito.

Palabras claves: Bolsa de energía, mercado desregulado, análisis de estabilidad.

Abstract

This paper shows the development and implementation of a model that allows analysis of the Colombian electricity market, using integral-differential equations with information from the Bulk Power Electricity Market data-base. The cost function parameters were obtained for each

Fecha de recepción: 2 de mayo de 2005
Fecha de aceptación: 18 de enero de 2007

* Grupo de Investigación en Alta Tensión (GRALTA). <http://www.gralta.univalle.edu.co>
gralta@univalle.edu.co Universidad del Valle. Cali - Colombia

** Ingeniera Electricista y M.Sc y estudiante de doctorado en Ingeniería Eléctrica, Universidad del Valle.

Correspondencia: Ciudad Universitaria Meléndez, Edificio 355, Cali (Colombia). sml_78@yahoo.com

*** Ingeniero Electricista y M.Sc en Ingeniería Eléctrica, Universidad del Valle. Ph.D de la Universidad de Strathclyde, Glasgow (Escocia). Profesor asociado de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. clozano@univalle.edu.co

**** Ingeniera electricista, M.Sc en Sistemas de Generación de Energía Eléctrica y Ph.D. en Ingeniería con énfasis en Ingeniería Eléctrica, Universidad del Valle. Profesora titular de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle. glacadel@univalle.edu.co

one of the generator agents, which exercise the most effects on the market. With these cost functions simulations were carried out analyzing the stability of the spot market. The model presented for the market stability analysis considers generator operating constraints, which have not been considered in the revised literature.

Key words: Spot Market, deregulated market, stability analysis.

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 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.

F. Alvarado [3] discute la estabilidad económica de un mercado en un sistema de potencia simple, usando la teoría de control lineal. Según esta teoría, por medio de una simulación dinámica, se puede predecir la estabilidad de un sistema y encontrar puntos de equilibrio.

Otros autores, como D. Lane, C. Richter, G. Sheblé [12], opinan que el método propuesto por Alvarado puede ser muy complejo al utilizarlo en modelamiento de mercados para grandes sistemas y proponen el método de algoritmos genéticos. Sin embargo, con este método, como lo mencionan los mismos autores, no se puede realizar análisis de estabilidad. De todos modos, en esta investigación se utilizó el método de ecuaciones diferenciales propuesto por Alvarado porque se requería análisis de estabilidad del precio de energía en un sistema real, que, además, no se había trabajado en otra investigación.

Este artículo presenta, entonces, el desarrollo e implementación de una herramienta computacional con la estructura y características del mercado colombiano que permite realizar un análisis de la operación de cada agente y la del precio de energía. En esta herramienta, se utilizaron ecuaciones integro/diferenciales, 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 influyen en el modelo para realizar el análisis de la operación de un mercado de electricidad desregulado. En la Figura 1, se presentan algunas de las señales de entradas y salidas que influyen en el comportamiento dinámico de los generadores y del precio en bolsa en un mercado competitivo.

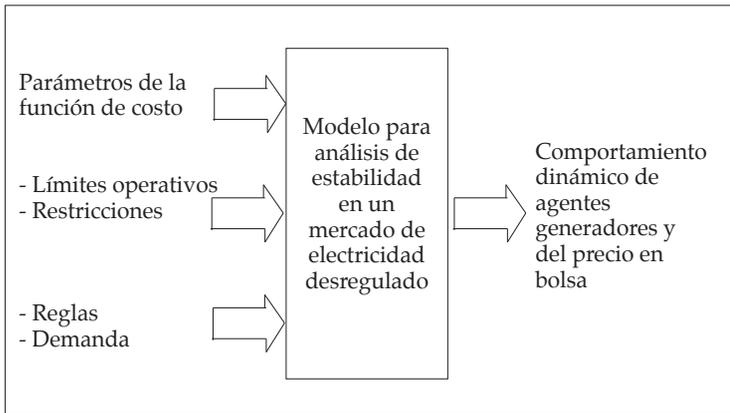


Figura1. Entradas y salidas del modelo de análisis de estabilidad del mercado

Establecer el comportamiento dinámico de los agentes generadores y del precio en bolsa en un mercado de electricidad desregulado es un problema complejo debido a:

- (a) *Número de agentes.* Cada agente generador se debe modelar en forma independiente, puesto que las funciones de costo varían para cada uno de ellos.
- (b) *Número de variables.* Para cada uno de los modelos de los agentes, se deben considerar las variables que afectan las funciones de costo: condiciones ambientales, restricciones de red, fuente de energía predominante en el sistema, políticas económicas, método de subasta implementado, reglas del mercado y demanda del sistema, entre otras. Además, la combinación de estas variables afecta el costo de generación; por lo tanto, deben existir varias funciones de costo para cada uno de los agentes.

3. MODELO PARA ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL MERCADO APLICADO A COLOMBIA

El modelo para análisis de estabilidad del mercado se obtuvo a partir de la información del mercado mayorista colombiano, correspondiente al año 2002. En este estudio se consideraron las siguientes variables:

- Periodos de tiempo diarios, mensuales y horarios en: Demanda comercial, generación ideal y precio en bolsa.
- Periodos de tiempo diarios y mensuales en: Aportes de ríos medios históricos, aportes ríos (volumen), aportes ríos (energía).
- Periodos de tiempo horarios: Disponibilidad comercial y precio de oferta.

Después de analizar estas variables, se hicieron las siguientes consideraciones para simplificar el modelo de los agentes generadores y del mercado:

- (a) Se redujo el número de agentes generadores modelados, seleccionando los más influyentes en la definición del precio en el mercado.
- (b) Se clasificaron los grupos de agentes de acuerdo con la región, a fin de reducir las variables climatológicas.
- (c) Las plantas inflexibles no fueron modeladas, considerándose más bien la potencia que suministran a la red, como base para cubrir la demanda.

En el modelo se utilizaron ecuaciones integro/diferenciales para observar los comportamientos dinámicos de las variables involucradas.

4. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

En la Figura 2, se presenta el diagrama esquemático del modelo para análisis de estabilidad del mercado implementado en Simulink de Matlab para uno de los grupos de generación.

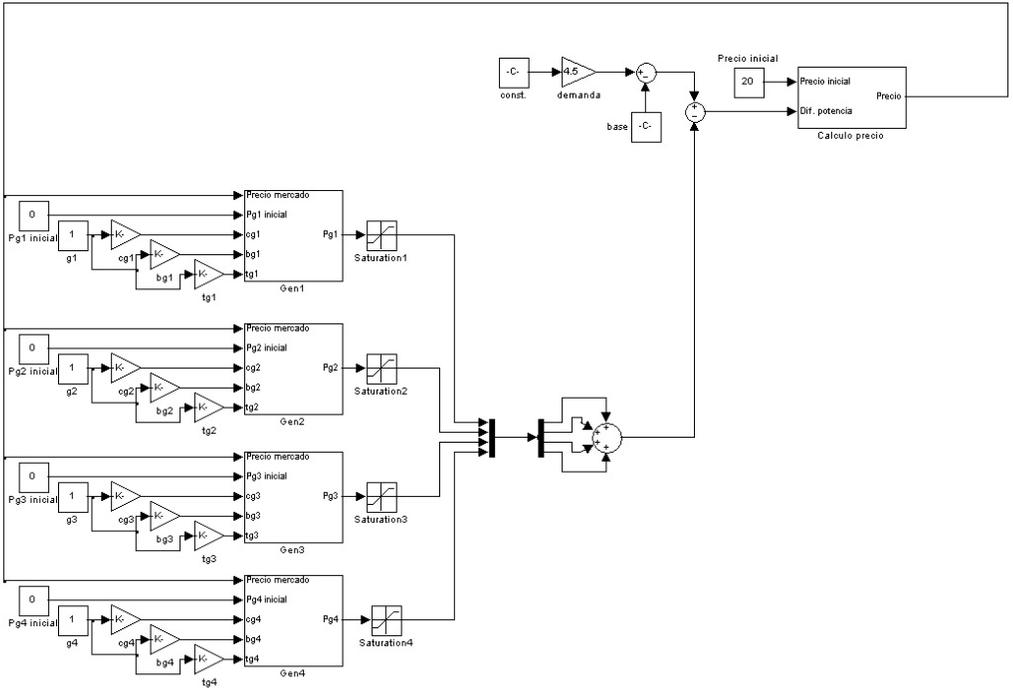


Figura 2. Modelo en Simulink para un solo grupo de generadores

Los parámetros de la función de costo, la potencia de generación inicial y el precio en bolsa calculado son los datos de entrada a los bloques correspondientes a cada uno de los agentes generadores modelados del Mercado de Energía Mayorista Colombiano. La señal de salida del modelo de cada agente corresponde a la potencia de generación calculada, la cual llega a un bloque de saturación que verifica el cumplimiento de los límites operativos y determina la potencia de generación restringida.

Las señales de salida de todos los agentes son sumadas para determinar la potencia total disponible del sistema. Este resultado es utilizado junto con la demanda para determinar la diferencia de potencia y, finalmente, calcular un valor parcial en el precio de la energía. La señal de precio resultante realimenta los modelos de los agentes, y se estabiliza en el momento en que la generación iguala la demanda. Como señal de salida se obtiene el comportamiento dinámico del precio de la energía.

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

a. Selección de agentes generadores

Para definir los agentes generadores en el estudio, se calculó el número de veces que los generadores flexibles estuvieron en mérito durante el año 2002 [1]. A partir de esta información se obtuvo el porcentaje de participación en bolsa de cada generador en ese año, considerando los que tenían un porcentaje de participación mayor o igual a 20%.

b. Determinación de los parámetros de la función de costo

Debido a que el sistema de oferta de los generadores es un sistema simple (potencia disponible y precio unitario) y no un sistema multi-partes (parámetros de la función de costo), es necesario determinar los parámetros de la función de costo a partir de los datos disponibles [1]. Para esto, se graficaron, en cada una de las centrales escogidas, las ofertas realizadas durante todo el año, que corresponden a: precio de oferta (\$/kWh) y disponibilidad declarada (kW). Según las graficas, se observó que para valores iguales de potencia se tenían diferentes precios de oferta, lo cual significa que el costo de generar cierta cantidad de potencia varía de acuerdo con las condiciones en las que se esté produciendo (restricciones, condiciones ambientales, entre otras). Por lo tanto, se asumió que el precio de oferta correspondía al costo marginal λ_{gi} y que estaría representado por la ecuación (1):

$$C_{gi} = P_{gi} + b_{gi} + k_i \quad (1)$$

en donde,

P_{gi} : Potencia generada por el agente i

c_{gi} , b_{gi} : Parámetros función de costo del agente i

K_i varía entre $0 \leq K_i \leq K_{max} i$.

De la distribución de datos graficados, se tomaron dos puntos que representan una tendencia de línea recta para el costo base ($k = 0$), y otros dos puntos que representan otra para el costo máximo ($k = k_{max}$).

En la Figura 3, se presenta un sistema con dos generadores que permite observar la forma como se determinaron las líneas de tendencia.

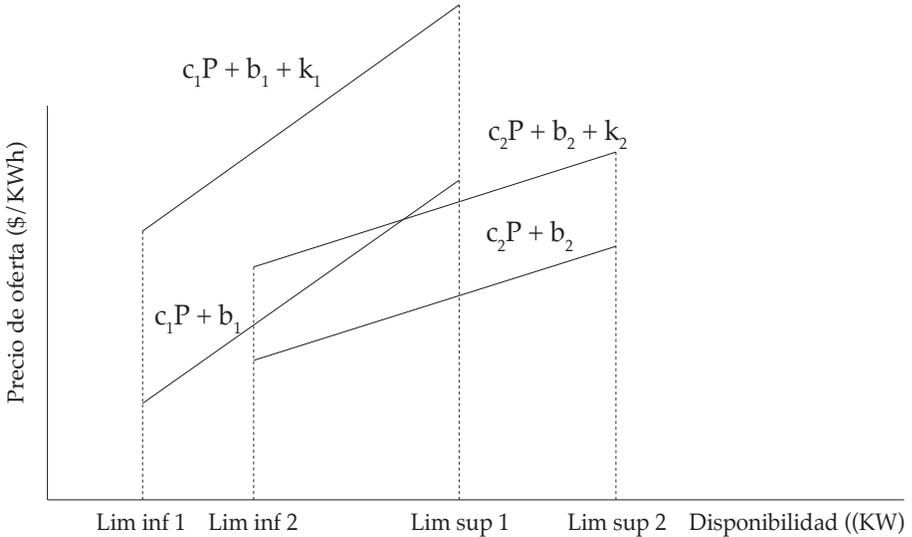


Figura 3. Funciones de costo para dos generadores

5. RESULTADOS

Con el fin de verificar el funcionamiento del modelo, se realizó una simulación que representa el cambio de la función de costo base a la función de costo con k_{\max} . Los resultados de esta simulación se presentan en la Figura 4.

En la Figura 4, se observa que, para un cambio en la función de costo de los generadores, no se presenta inestabilidad en el sistema, aunque sí se presenta un aumento considerable en el valor de estado estable en el precio del mercado. Sin embargo, si más del 50% de los generadores presentan un cambio de pendiente en su función de costo, debido a economías de escala, se presenta inestabilidad en el precio del mercado. Aunque esta inestabilidad no se refleja en la respuesta de los generadores que la están provocando, debido a que todos tienen restricción por capacidad máxima de generación, lo que no permite que su respuesta crezca indefinidamente.

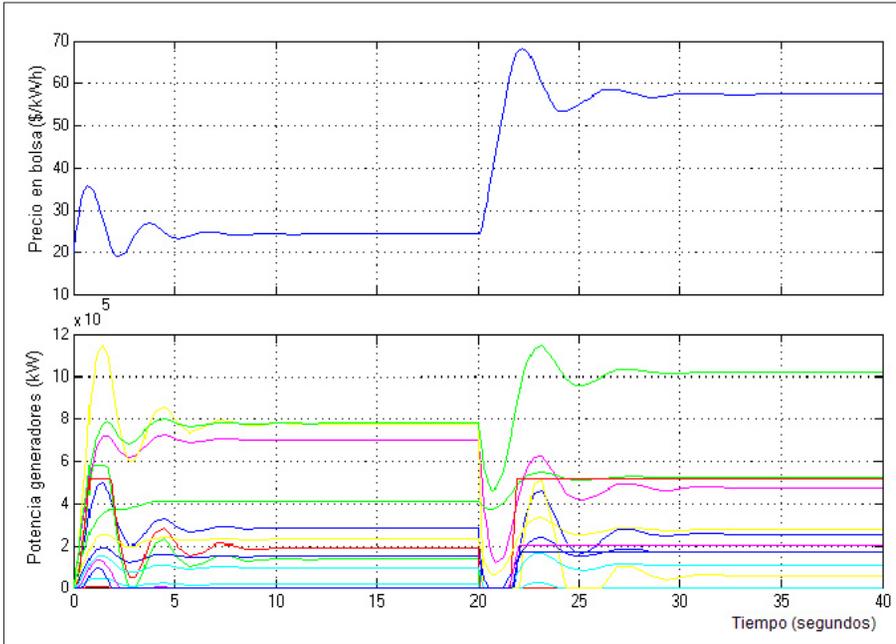


Figura 4. Simulación con cambio en los parámetros de la función de costo

6. CONCLUSIONES Y APORTES

Se desarrolló e implementó una herramienta que permite analizar la operación del mercado de electricidad colombiano en el corto plazo (diario) y se observó que es un sistema robusto.

El modelo presentado en esta investigación para análisis de estabilidad del mercado considera las restricciones operativas de los generadores. De acuerdo con la literatura revisada, tales restricciones no han sido tenidas en cuenta en los modelos presentados en otras investigaciones para este propósito. Esto permite obtener un comportamiento más cercano a la operación real de los generadores.

Los agentes generadores del Mercado de Electricidad Colombiano que se incluyeron en el modelo, se modelaron en forma independiente, lo que proporciona flexibilidad al modelo en cuanto a variación de los parámetros e inclusión de nuevos agentes generadores.

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

Aunque se utilizó una gran cantidad de datos para definir los parámetros de la función de costo, estos no fueron suficientes, debido a que los generadores presentan, en la mayoría de los casos, sólo su potencia nominal o un valor cercano a esta como potencia disponible, obteniendo una acumulación de puntos en la misma región de la función de costo y muy poca información para los otros tramos de la función. Para lograr una mayor precisión en la definición de los parámetros, se hace indispensable contar con información en un rango de potencia más amplio para cada uno de los generadores.

Referencias

- [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, Cali, Universidad del Valle, 2004.
- [3] F. ALVARADO, "The stability of power system markets", *IEEE/PES Summer Power Meeting*, San Diego, California, July 1998.
- [4] A. DAVID, "Dispatch methodologies for open access transmission systems", *IEEE Transactions on power systems*, Vol. 13, No. 1, February 1998.
- [5] 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.
- [6] G. GROSS, D. FINLAY, "Generation supply bidding in perfectly competitive electricity markets", *Computational & Mathematical Organization Theory* 6, pp. 83-98, 2000.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] M. MADRIGAL, V. QUINTANA, "Using optimization models and techniques to implement electricity auctions", *IEEE Engineering Society Winter Meeting*, 2000.
- [10] 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.

- [11] C. SKOULIDAS, C. VOURNAS, G. PAPAVALASSILOPOULOS. "Adaptive game modeling of deregulated power markets", *IEEE Power Engineering Review*, pp. 42 – 45, September 2002.
- [12] D. LANE, C. RICHTER, G. SHEBLÉ. "Modeling dynamic electricity markets with intelligent agent based economics", North American Power Symposium held in San Luis Obispo, CA in October, 1999.
- [13] V. PETROV, C. RICHTER, G. SHEBLÉ. "Predatory gaming strategies for electric power markets", 2000.
- [14] A. MOTTO, F. GALIANA. "Equilibrium of auction markets with unit commitment: the Need for augmented pricing", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 17, No. 3, August 2002.