
MICROMUNDO PARA SIMULAR UN MERCADO ELÉCTRICO DE CORTO PLAZO

Carlos Jaime Franco¹
Juan David Velásquez²
David Cardona³

Franco, C.J., Velásquez, J.D. y Cardona, D. (2012). Micromundo para simular un mercado eléctrico de corto plazo. *Cuadernos de Economía*, 31(58), 229-256.

En este trabajo se presenta un micromundo para la simulación de una bolsa de energía, el cual se elaboró en respuesta a la necesidad de facilitar el aprendizaje del esquema de bolsa de energía con despacho centralizado a los interesados en

¹Doctor en Ingeniería y Magíster en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Se desempeña actualmente como director del Área Curricular de Sistemas y Administración de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia (Sede Medellín, Colombia) y como Profesor Asociado de la misma institución. Miembro del grupo de investigación Sistemas e Informática. E-mail: cjfranco@unal.edu.co. Dirección de correspondencia: Dirección de correspondencia: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Cra. 80 65-223, Bloque M8A Of. 210 (Medellín, Colombia).

²Doctor en Ingeniería y magíster en Ingeniería de Sistemas. Se desempeña actualmente como director del Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia (Sede Medellín, Colombia) y como Profesor Titular de la misma institución. Director del grupo de investigación Sistemas e Informática. E-mail: jdvelasq@unal.edu.co. Dirección de correspondencia: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Cra. 80 65-223, Bloque M8A Of. 206 (Medellín, Colombia).

³Magíster en Ingeniería de Sistemas. Miembro del grupo de investigación Sistemas e Informática. E-mail: dcardon@unal.edu.co. Dirección de correspondencia: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Cra. 80 65-223, Bloque M8A Of. 201 (Medellín, Colombia).

Este artículo fue recibido el 3 de agosto de 2011, la nueva versión el 18 de enero de 2012 y su publicación aprobada el 14 de febrero de 2012.

este mercado. El micromundo cuenta con un modelo climático para simular los fenómenos de El Niño y La Niña, y con un modelo para la generación de los precios de oferta de los generadores, además es altamente parametrizable y permite simular diversos tipos de mercados eléctricos.

Palabras clave: aprendizaje, simulación por computador, mercados de energía, bolsas de energía, modelos del clima.

JEL: A22, Q40, C63.

Franco, C.J., Velásquez, J.D. y Cardona, D. (2012). Microworld For Simulating A Spot Electricity Market. *Cuadernos de Economía*, 31(58), 229-256.

This work introduces a simulation microworld for an energy spot market. Electric utilities privatization and enforcement of market oriented architectures have been on stage in the electricity generation business for some time; one of the problems with this new approach is that market participants and interested people have not been adequately trained to operate in the new environment, therefore, this work is presented as a tool to ease the learning of the energy spot market architecture. The microworld has a climate model to simulate the El Niño Southern Oscillation (ENSO) and a model to generate the supply price of the generators, besides it is highly customizable, and can simulate diverse types of energy pricing markets.

Keywords: learning, computer simulation, energy markets, energy spot markets, climate models.

JEL: A22, Q40, C63.

Franco, C.J., Velásquez, J.D. y Cardona, D. (2012). Micromonde pour simuler un marché électrique à court terme. *Cuadernos de Economía*, 31(58), 229-256.

Dans ce travail on présente un micromonde pour la simulation d'une bourse d'énergie, lequel a été élaboré comme une réponse à la nécessité de faciliter l'apprentissage du schéma de bourse d'énergie avec répartition centralisé aux intéressés dans ce marché. Le micromonde dispose d'un modèle climatique pour simuler les phénomènes de « El Niño » et « La Niña », et avec un modèle pour la génération des prix d'offre des générateurs qui est hautement paramétrable et permet de simuler de divers genre de marchés électriques.

Mots clés : apprentissage, simulation par ordinateur, marchés d'énergie, bourses d'énergie, modèles du climat.

JEL: A22, Q40, C63.

En los últimos años, el concepto de competencia ha ido permeando el negocio de la generación de electricidad en todo el mundo; esto se ha debido a la incapacidad que tiene el esquema de propiedad pública para brindar al consumidor precios competitivos, garantizar el suministro de energía en el largo plazo y promover la investigación y el desarrollo en tecnología para la generación de electricidad. Comenzando con el mercado británico a finales de los años ochenta, varios países han ido liberalizando sus mercados eléctricos en busca de:

- Ofrecer precios competitivos, principalmente, a los grandes consumidores.
- Trasladar los riesgos inherentes del negocio de generación de electricidad a los inversionistas privados.
- Garantizar el suministro de electricidad a largo plazo a través de inversiones privadas.
- Promover la innovación, el desarrollo y la eficiencia en tecnologías de generación de electricidad.

Existen dos características fundamentales de la electricidad que impactan de forma directa el diseño de un mercado competitivo: primero, la oferta y la demanda deben ser iguales en todo momento, y segundo, la electricidad no se puede almacenar a bajo costo, tal como sí ocurre con muchos otros productos de la economía. Lo anterior implica que la demanda debe ser atendida de forma instantánea y que el sistema de generación debe poseer suficiente capacidad instalada para garantizar dicha atención instantánea.

En el esquema de mercado basado en una *bolsa de energía con despacho centralizado*, las empresas generadoras de electricidad compiten entre sí por producir la electricidad requerida para atender la demanda, mientras que la red de transmisión es operada y administrada por un único agente que brinda un acceso indiscriminado a todos los generadores. La selección de los generadores que abastecerán la demanda es realizada por un agente de control con base en las ofertas presentadas por todos los participantes. Adicionalmente, como complemento al mecanismo de subasta de corto plazo, se permite la negociación de contratos bilaterales entre agentes como un mecanismo de cobertura contra la volatilidad de los precios de bolsa.

No obstante, la implantación de un mercado de libre competencia hace que la dinámica que siguen los precios de la electricidad sea más compleja, complicando los procesos de toma de decisiones. Dicha complejidad es explicada por la influencia de múltiples factores en la oferta, la demanda y la regulación. Como consecuencia de lo anterior, el comportamiento de los precios de la electricidad se ve caracterizado, entre otros, por pronunciados ciclos de diferente periodicidad, alta volatilidad, fuertes variaciones de año a año y de estación a estación, correlaciones de alto orden, cambios estructurales y valores extremos (Velásquez, Dyer y Souza, 2007). Más aun, los precios se ven influenciados en el corto plazo por las condiciones particulares de las variables que describen las condiciones del merca-

do, mientras que dependen del crecimiento de la demanda y de la expansión de capacidad en el largo plazo.

La operación eficiente en el mercado implica que las organizaciones deben tomar las mejores decisiones operativas y estratégicas a la luz de la información disponible; esto implica que quienes deciden deben tener, entre otros, un conocimiento profundo sobre los precios de la electricidad, su dinámica, así como sobre los mecanismos que dictaminan su evolución. Como consecuencia, las organizaciones deben invertir recursos para el entrenamiento del personal con el fin de desarrollar habilidades en el manejo de riesgo del mercado y en la formulación, puesta en marcha y evaluación de estrategias corporativas que permitan aprovechar las oportunidades de negocio que se presenten en un momento determinado.

Para el caso colombiano, se inicia la liberalización del sector eléctrico con la expedición de las leyes 142 (ley de servicios públicos) y 143 (ley eléctrica) de 1994, en las cuales se limita la integración vertical de la cadena productiva, mientras que el Estado asume el rol de regulador. Esto expuso a los generadores de electricidad colombianos a una mayor incertidumbre; sin embargo, les proporciona también una mayor autonomía para la toma de decisiones. Consecuentemente, se hace necesario entrenar a los agentes para que operen de manera eficiente en este nuevo entorno, para que aprovechen las oportunidades de negocio y administren adecuadamente los riesgos operativos.

Uno de los mecanismos para realizar el entrenamiento de personal y lograr el desarrollo de la comprensión y el conocimiento de un mercado es la utilización de juegos basados en la simulación del entorno en que deberá desenvolverse el participante. Un subconjunto de este tipo de herramientas son los micromundos (Papert, 1980) y los *management flight simulators* (MFS, por su sigla en inglés) (Sterman, 1992).

El término micromundo es usado por Papert (1980) para describir cualquier ambiente que motive la comprensión y el aprendizaje de conceptos complejos relacionados con el funcionamiento de un sistema como un todo, a través de la exploración y manipulación de dicho ambiente por parte del usuario. Los MFS son modelos (no necesariamente computarizados) en los que se simula la operación de una o más compañías en un mercado. Durante la simulación, el usuario asume el rol del administrador y su papel es tomar decisiones en tiempo real que permitan alcanzar los objetivos del sistema (o de la compañía). En los MFS se busca que el usuario gane una mayor comprensión y un entendimiento de los efectos de sus decisiones, tanto en el corto como en el largo plazo. Finalmente, puede considerarse que los MFS son un caso particular de los micromundos.

En este sentido, tanto los micromundos como los *management flight simulators* están diseñados específicamente como herramientas para promover la comprensión y el aprendizaje del entorno. En este sentido, no se les debe considerar como una herramienta de la teoría de juegos, puesto que esta última tiene como fin el estudio

del comportamiento racional en situaciones de interdependencia en las que participan dos o más jugadores con el objetivo de encontrar estrategias que les permitan *ganar* el juego.

La eficiencia de los micromundos como herramientas que aceleran el aprendizaje organizacional ha interesado a la comunidad científica durante los últimos años. Compañías de renombre mundial como Shell han incorporado los micromundos a sus estrategias de desarrollo organizacional (Morecroft, 2007). Adicionalmente, los micromundos son una línea de investigación activa en la MIT Sloan School of Management. A pesar de lo anterior, un análisis de cómo los micromundos contribuyen al aprendizaje organizacional va más allá del alcance de este trabajo; sin embargo, una revisión sobre este tema es presentada por Senge (1990).

Entre los ejemplos más representativos de los micromundos y MFS se encuentran:

- El Juego de la Cerveza (Senge y Lannon, 1997).
- People Express (Senge y Lannon, 1997).
- Oil Producers (Senge y Lannon, 1997).
- Beefeater Restaurants (Senge y Lannon, 1997)
- EnerBiz (Dyner, Larsen y Franco, 2008).

El Juego de la Cerveza (Senge y Lannon, 1997) es un desarrollo de la MIT Sloan School of Management (que es parte del Massachusetts Institute of Technology). Este micromundo se usa para demostrar principios clave de una cadena de suministro; sus jugadores deben abastecer su demanda de cajas de cerveza, intentando mantener sus costos de inventario y demanda no atendida al mínimo.

People Express (Senge y Lannon, 1997) fue una aerolínea de bajo costo que operó en los Estados Unidos y su objetivo era proveer viajes aéreos de bajo costo. Inicialmente tuvo un gran crecimiento, pero después de un tiempo quebró abruptamente. El CEO de People Express atribuyó la quiebra al desarrollo de sistemas computarizados desarrollados por las grandes aerolíneas para el balanceo de carga, lo que les permitía ofrecer un número limitado de asientos a bajo costo. Para verificar cuáles fueron en realidad las causas de la quiebra de People Express, Serman (2000) desarrolló un modelo de simulación que permitió concluir que la compañía tenía problemas en su estructura interna debido a una falta de coordinación de sus objetivos.

EnerBiz (Dyner, Larsen y Franco, 2008) es un micromundo que fue desarrollado usando la dinámica de sistemas para el entrenamiento de comercializadores de electricidad en el manejo del riesgo asociado a la operación en el mercado. En EnerBiz el usuario debe conformar un portafolio de contratos de energía para operar en el mercado y cualquier déficit o exceso es comprado o vendido en la Bolsa de Energía al precio de bolsa, que es generado internamente por el sistema; para cada contrato, el usuario debe especificar: su tipo (compra/venta), el precio y la cantidad de la electricidad, y la duración del contrato. En EnerBiz se asume que

el único objetivo del participante es maximizar su utilidad por medio de la compra y venta de contratos mientras atiende a su demanda regulada. Este micromundo se centra en la negociación bilateral de contratos entre participantes del mercado y ha sido usado por Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P. (ISA) y otras entidades en talleres acerca del mercado eléctrico colombiano.

Un aspecto crucial que emerge en este punto es que los micromundos no son herramientas predictivas ni de apoyo a la toma de decisiones. Las principales diferencias entre los micromundos y los sistemas predictivos y de apoyo a las decisiones son las siguientes:

- En los micromundos los usuarios son parte de los agentes activos del sistema durante la corrida, quienes toman decisiones teniendo en cuenta la retroalimentación del sistema. El fin principal del micromundo es realizar una medida del desempeño del usuario. En los sistemas de predicción y de toma de decisiones, los usuarios definen únicamente los parámetros de ejecución del sistema y no son parte de los agentes del modelo durante la ejecución; su finalidad es entregar el pronóstico de la evolución de las principales variables del sistema o las recomendaciones para la toma de decisiones.
- En los sistemas de predicción y de apoyo a la toma de decisiones, el sistema real es representado de la forma más fiel posible, lo que puede llevar a una alta complejidad de la herramienta computacional. En los micromundos la representación es tan compleja como sea posible, pero no tan compleja que imposibilite el aprendizaje del usuario; así, debe existir un balance entre la complejidad de la representación y el logro de las metas de aprendizaje del usuario. Consecuentemente, los micromundos suelen ser representaciones más simples de la realidad en comparación con los sistemas de pronóstico y de apoyo a la toma de decisiones.

Por ejemplo, para el caso colombiano, Velásquez (2009) desarrolla un sistema de predicción condicional de los precios mensuales de bolsa caracterizado por los siguientes aspectos:

- Es un sistema de simulación, cuyo módulo principal implanta de forma detallada las reglas de mercado para la formación de precios de bolsa (subasta y precio de escasez).
- Contiene un subsistema de predicción de la demanda que, partiendo de la demanda real y de un escenario de crecimiento de la demanda, entrega la predicción de la demanda mensual para el horizonte de pronóstico.
- Contiene un subsistema que modela las variables físicas del mercado y entrega pronósticos de la generación hidráulica y térmica, nivel del embalse agregado, embalse ofertable y aportes, entre otros.
- Contiene un subsistema que modela las variables económicas del mercado y entrega pronósticos del IPC, CERE, costos de racionamiento, precios de ejercicio, etc.

El sistema desarrollado por Velásquez (2009) es predictivo y entrega como su principal resultado la predicción de los precios mensuales de la electricidad en la Bolsa, así como sus intervalos de confianza, que son condicionales al escenario considerado de crecimiento de la demanda. Al igual que para los micromundos, este sistema representa detalladamente muchos aspectos del mercado; no obstante, ya que su fin es el pronóstico, no permite la interacción que usualmente tiene el usuario en un micromundo; por ejemplo, no está diseñado para que se prueben diferentes estrategias de comercialización de la electricidad en la Bolsa, ni promueve el aprendizaje en el sentido de que se aprendan a tomar mejores decisiones en condiciones reales de operación.

En otras palabras, la regla fundamental en el diseño y desarrollo de los micromundos y los *management flight simulators* es la implantación de las reglas de mercado y la forma en que operan las empresas, de manera tal que se den comportamientos similares. En otras palabras, el fin no es reproducir el comportamiento histórico de un mercado particular o modelarlo con el fin de obtener conclusiones que expliquen su comportamiento histórico, ni realizar predicciones sobre su evolución futura. El lector interesado en los aspectos relacionados con la predicción de los precios de bolsa y el análisis de la dinámica para el mercado colombiano puede remitirse a Velásquez (2009).

No existe duda sobre la complejidad del comportamiento de los mercados eléctricos liberalizados basados en generación hidrotérmica, tal como el mercado eléctrico colombiano (Velásquez, 2009), ni sobre la importancia e impacto que han tenido los micromundos como herramientas de aprendizaje que ayudan a lidiar con este problema. Consecuentemente, el objetivo de este trabajo es presentar un micromundo que simula la operación de una bolsa de energía para ser utilizado como una herramienta pedagógica y de entrenamiento. El micromundo se centra solo en el mecanismo de bolsa y no incluye un sistema complementario de contratos; por lo tanto, la única decisión que debe tomar su usuario es el precio de oferta de su electricidad para un periodo de tiempo determinado. Nótese que en EnerBiz, a diferencia del sistema desarrollado en esta investigación, el usuario tiene como fin construir su portafolio de contratos y no puede ofertar en bolsa ni influir sobre la formación de los precios de bolsa. Cabe resaltar que el micromundo, al ser una herramienta pedagógica, no pretende representar ningún mercado específico, por ende su validación no estará ligada a los datos empíricos de ningún mercado, tal como ya se indicó.

La originalidad e importancia del modelo desarrollado está basada en los siguientes aspectos:

- Se desarrolla una herramienta computacional para capacitar al usuario sobre el funcionamiento de una bolsa de energía con despacho centralizado.
- Se incorporan los aspectos más relevantes de una bolsa de energía con despacho centralizado bajo diferentes condiciones hidrotérmicas para recrear el

funcionamiento del mercado real, de tal forma que la persona se enfrente a un mundo virtual con un comportamiento similar al mundo real.

- Permitir al usuario experimentar las consecuencias de sus decisiones ante diferentes situaciones de mercado, ya que, si bien el micromundo no es una representación exacta de la realidad, sí está construido sobre las mismas bases teóricas de una bolsa de energía con despacho centralizado (ley de oferta y demanda, despacho por orden de mérito, disponibilidad hidráulica, etc.), sin tener en cuenta, como ya se mencionó antes, el mercado de contratos.
- Parametrizar las condiciones de las simulaciones, de tal forma que se puedan recrear diferentes escenarios de operación en los cuales debe desenvolverse el usuario. Esto permite que se puedan definir diferentes condiciones respecto a la hidrología, la capacidad de almacenamiento de agua, el margen entre oferta y demanda, la relación parque hidráulico/parque térmico, etc. La importancia de este radica en que se busca que el usuario desarrolle estrategias para diferentes estados del mercado y se adapte mejor a cambios futuros como, por ejemplo, al ingreso de nuevos competidores o la presencia de fenómenos hidrológicos.

El trabajo aquí presentado no constituye una herramienta de predicción acerca del comportamiento del mercado; sin embargo, se puede simular el comportamiento estratégico de los agentes de un mercado de energía, el cual es, en última instancia, el que determina el precio de una bolsa. Adicionalmente, este trabajo pretende llenar un vacío existente en la capacitación de personas interesadas en el funcionamiento de las bolsas de energía, permitiéndoles *aprender haciendo*.

El resto de este artículo está organizado de la siguiente manera: en la siguiente sección, se describe la Bolsa de Energía; posteriormente, se describe el modelo desarrollado; después, se presenta la validación del modelo. Finalmente se presentan los resultados obtenidos y se concluye.

BOLSA DE ENERGÍA

Las bolsas de energía operan como un mecanismo de subasta de los excedentes de electricidad que se generan después de cubrir los compromisos adquiridos en los contratos de largo plazo. La cantidad de electricidad negociada es igual a la demanda del sistema menos las compras en contratos. Un esquema básico de su funcionamiento se presenta a continuación (Einhorn, 1994).

Con un día de anticipación, los generadores envían al operador del sistema la cantidad de electricidad que están dispuestos a generar para la unidad de medición de tiempo definida para el mercado, así como el precio al que están dispuestos a venderla; estos son los precios de oferta y suelen estar especificados en \$/kWh. El operador ordena estos precios de menor a mayor (mérito económico) y, usando pronósticos de la demanda, realiza un despacho preliminar para cada unidad

de tiempo en la que se divide el día. Los despachos se realizan de manera horaria e incluso intrahoraria, dependiendo de la tecnología de operación disponible (Zaccour, 1998). El precio de la oferta con la cual se alcanza el cubrimiento de la demanda del sistema se conoce como precio de bolsa.

La descripción anterior simplifica bastante el funcionamiento de una bolsa de energía. Por ejemplo, no tiene en cuenta las restricciones físicas y de estabilidad del sistema de transmisión, ni las eventualidades que pueden presentarse en la red eléctrica o en el parque de generación; sin embargo, una explicación más a fondo de un mercado de este tipo va más allá del alcance de este trabajo.

EL MODELO

El micromundo desarrollado en esta investigación es monousuario, es decir, solo hay un agente real en el micromundo (el usuario). El usuario asume el rol de un generador de electricidad que participa en una bolsa de energía y que tiene el único objetivo de obtener la máxima ganancia posible. La única decisión que el usuario puede tomar es su precio de oferta. Bajo las premisas anteriores, se busca que el usuario:

- Tenga en cuenta los aspectos fundamentales que influyen en la formación del precio de bolsa de la electricidad.
- Aprenda a competir en el mercado.
- Aprenda a administrar adecuadamente el agua disponible en el caso de los generadores hidráulicos.
- Se exponga a los riesgos de la volatilidad de la bolsa y a la incertidumbre de la hidrología, y, así, aprenda a identificar sus riesgos y oportunidades.
- Comprenda las consecuencias de sus decisiones en el corto y en el largo plazo.

Los aspectos que se tuvieron en cuenta en el diseño e implementación del micromundo son:

- Factores climáticos: se desarrolló un modelo climático que permite simular la presencia de eventos hidrológicos extremos, tales como los fenómenos de El Niño y La Niña, tal como ocurren en el mercado colombiano.
- Diferentes tipos de generadores: las diferencias tecnológicas entre los generadores de electricidad ocasionan diferentes comportamientos estratégicos. En el micromundo se utilizan dos tipos diferentes de generadores: hidráulicos y térmicos.
- Demanda y oferta del sistema: en cualquier entorno de mercado, el precio en cada unidad de tiempo está influenciado por la ley de oferta y demanda; debido a esto, se incluye en el micromundo un parámetro que determinará la demanda del sistema, mientras que la oferta está representada por cada uno de los agentes de la simulación.

- Comportamiento de los agentes: en un entorno de mercado, los agentes utilizan diferentes estrategias, dependiendo de sus condiciones particulares y de las condiciones del mercado en determinado momento. Estas estrategias se ven reflejadas en el precio de su oferta, ya que es por este medio como los generadores influyen en el precio de bolsa. En el micromundo desarrollado, estas estrategias se capturaron usando modelos de redes neuronales artificiales.

Adicionales a los anteriores, existen otros factores que influyen en el mercado como, por ejemplo, los niveles de contratación de los generadores o las restricciones del sistema; sin embargo, como ya se mencionó anteriormente, este trabajo no pretende ser una herramienta de predicción o análisis de ningún mercado específico (aunque se diseñó teniendo en cuenta los aspectos fundamentales del mercado colombiano), sino un instrumento pedagógico que instruya a los interesados acerca del funcionamiento de una bolsa de energía con despacho centralizado y les ayude a desarrollar estrategias para competir en estos mercados.

El micromundo está compuesto por varios modelos. Para los fenómenos climáticos se elaboró un modelo que permitiera simular los aportes hidrológicos, el cual está basado en el trabajo de Vallis (1986); por otro lado, un modelo de redes neuronales genera los precios de oferta de los generadores contra los que competirá el usuario. Adicionalmente, el micromundo cuenta con un módulo para simular la operación del mercado, un módulo financiero y un módulo de reportes.

Los datos usados por los modelos son creados endógenamente por el micromundo. En el momento de la inicialización, el micromundo crea una historia previa (datos de aportes hidrológicos, despachos, ofertas, etc.) a partir de los parámetros con los que este se configure (número de agentes, número de generadores térmicos, demanda del sistema, etc.). Cabe resaltar que estos parámetros son definidos por el usuario al inicio de cada ejecución del micromundo, de tal forma que se pueden introducir cambios en la configuración del mercado. A medida que avanza la simulación se van generando nuevos datos que son usados por los modelos para producir nuevos resultados.

Supuestos del modelo

A continuación se enuncian los supuestos que sirvieron de base para la elaboración del micromundo.

- Se utiliza un tamaño de paso trimestral para la simulación: con esto se busca que el usuario experimente el comportamiento del sistema en diferentes escenarios climáticos y se capacite para maximizar las ganancias al largo plazo.
- El usuario decide un precio de oferta para cada trimestre, es decir, el despacho se hace de manera trimestral.

- Para el despacho solo se tiene en cuenta el precio de oferta; no existen restricciones en la red eléctrica ni en los generadores; el despacho preliminar es, entonces, el despacho real. Este supuesto se establece con el objetivo de centrar al usuario en los aspectos económicos de la bolsa, dejando de lado las restricciones técnicas sobre las que no tiene control.
- La demanda durante el trimestre es constante, con un crecimiento anual especificado por el usuario. Este supuesto es consecuencia del tamaño de paso usado, ya que, en un periodo de tres meses, la demanda se puede suponer constante.
- Solo se tienen en cuenta generadores hidráulicos, térmicos a carbón y térmicos a gas.
- No hay restricciones al suministro de combustible de los generadores térmicos.

Con los supuestos anteriores se busca que el usuario dedique mayor atención al precio de oferta declarado y a la hidrología del sistema.

Diagrama causal del sistema

En la Gráfica 1 se presenta el diagrama causal del sistema que muestra la estructura que tiene el micromundo y las relaciones básicas entre sus variables. A continuación se presenta una breve explicación de las variables más importantes del sistema.

Como se puede apreciar, el nivel del embalse determina, en gran medida, el precio de oferta de un generador hidráulico, mientras que el precio de oferta del generador térmico está determinado por los costos variables de generación en los que espera incurrir cuando es despachado.

La variable Energía Hidroeléctrica representa la cantidad de energía que tienen almacenada los generadores hidráulicos en sus embalses. Esta variable influencia directamente al racionamiento debido a que los generadores térmicos siempre podrán obtener el combustible que requieran. Cuando en un trimestre se presenta racionamiento, las plantas que no generaron durante ese periodo son penalizadas con el monto calculado en la ecuación (1).

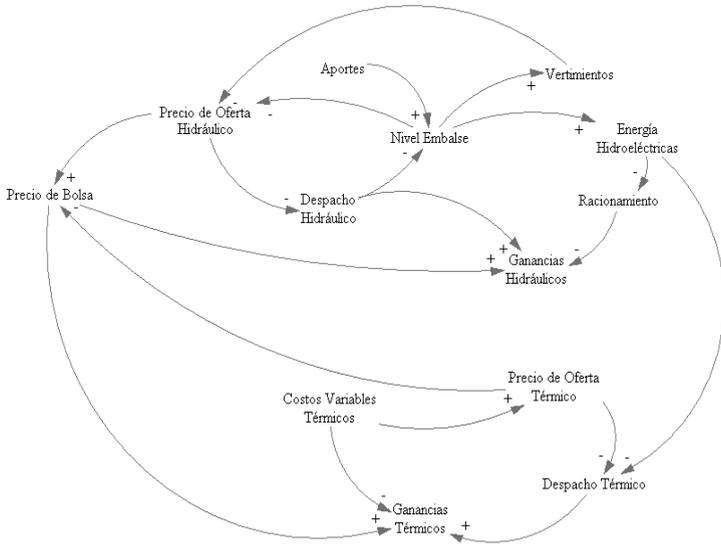
$$Penalizacion = (KWIns - KWUs) * HrsTrim * Cas \quad (1)$$

Donde $HrsTrim$ corresponde al número de horas del trimestre, $KWIns$ es la capacidad instalada del generador en kilovatios, $KWUs$ son los kilovatios de su capacidad instalada que usó para generar electricidad durante el trimestre y Cas corresponde a la tasa de penalización en \$/kWh que indica con cuánto dinero penalizar a un generador por cada kWh que pudo haber generado pero no generó, durante un trimestre en el cual se presentó racionamiento. Con la penalización se busca castigar a aquellos generadores que no administraron adecuadamente sus

recursos hidroeléctricos y no están en capacidad de generar electricidad durante un verano intenso.

La variable exógena Aportes está ligada al modelo climático y determina cuánta agua ingresa a los embalses de las hidroeléctricas durante un trimestre.

GRÁFICA 1.
DIAGRAMA CAUSAL DEL SISTEMA



Fuente: elaboración propia.

El nivel del embalse en el periodo actual se obtiene al realizar el balance de masa, también conocido como ecuación de continuidad del embalse. Sin embargo, en vez de utilizar unidades de volumen, se suele utilizar su equivalente en energía. Así, el volumen del embalse al final del periodo actual t , es igual al volumen inicial al principio del periodo actual t (que es igual al volumen final del periodo $t - 1$), más los aportes en t , menos el caudal turbinado en t . El volumen final así obtenido no puede superar el volumen máximo del embalse. Así, el caudal vertido se obtiene como el volumen al final de la etapa por encima del volumen máximo almacenable, tal que el volumen almacenado en el embalse nunca sobrepasa dicho valor máximo.

Las ganancias de las centrales hidráulicas provienen de multiplicar la cantidad de electricidad generada por el precio de bolsa del periodo menos la penalidad por racionamiento en caso de que la hubiese. En el caso de las térmicas se utiliza el mismo procedimiento anteriormente mencionado, restando adicionalmente el costo variable térmico, el cual es en este modelo el costo de combustible utilizado para

generar. Note que este es un cálculo simplificado que no incluye costos de capital ni otros costos fijos y variables, debido a que se desea hacer énfasis en el proceso de ofertas y despacho de energía de corto plazo, más que en el de inversión.

Modelo climático

En mercados eléctricos como el colombiano, la presencia de condiciones hidrológicas extremas puede causar importantes cambios en el régimen de aportes hidrológicos a las plantas de generación hidráulica. Particularmente para Colombia, se consideran únicamente dos estaciones climáticas: invierno (mayo a noviembre) y verano (diciembre a abril). En condiciones normales se llenan los embalses durante el invierno, de tal forma que alcancen su máximo almacenamiento al final de esta etapa, y son vaciados durante el verano, de tal forma que alcancen su nivel mínimo cuando se inicie la siguiente estación de invierno. Esta forma de operación busca racionalizar el uso del agua y minimizar el costo de generación de electricidad.

En eventos hidrológicos extremos secos, los aportes durante el invierno son muy inferiores a su media histórica, de tal forma que los embalses no se alcanzan a llenar cuando se inicia el siguiente verano; consecuentemente, hay déficit de agua para generación y la demanda debe ser atendida usando plantas térmicas aumentando el precio de la electricidad en el mercado spot. Se sabe que estos fenómenos son aperiódicos con intensidad variable y no pronosticables en el largo plazo. Adicionalmente, en mercados donde es predominante la generación hidráulica, el exceso o escasez del agua puede generar importantes variaciones en el nivel y la volatilidad de los precios en el mercado spot (Velásquez, 2009). Consecuentemente, cualquier modelo del mercado spot debe incluir, de forma obligatoria, un mecanismo que permita simular dichos eventos extremos y su influencia sobre la hidrología.

El micromundo usa un modelo climático basado en el trabajo realizado por Vallis (1986); el aporte de su trabajo consiste en un sistema de tres ecuaciones diferenciales que describen el fenómeno de El Niño sin usar ninguna técnica estocástica para generar la aperiodicidad que caracteriza a este fenómeno.

A continuación se presenta una breve explicación del modelo climático. Imagine el océano Pacífico como una caja de fluido caracterizada por temperaturas en el Este y en el Oeste (T_e y T_w) y una corriente oceánica con velocidad u . La corriente es dirigida por un viento superficial que es, en parte, generado por el gradiente de las temperaturas $(T_e - T_w)/\Delta x$. De esta manera se establece una circulación de Walker parametrizada sobre el océano Pacífico tropical. Una temperatura fría en el Este produce un viento superficial hacia el Oeste, por la tendencia del aire a levantarse sobre el aire caliente, esto se expresa en la ecuación (2).

$$\frac{du}{dt} = \frac{B(T_e - T_w)}{2\Delta x} - C(u - u^*) \quad (2)$$

Asumiendo una profundidad del océano a temperatura constante (\bar{T}), una simple aproximación por diferencias finitas para la ecuación de temperaturas del fluido se presenta en las ecuaciones (3) y (4):

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{u(\bar{T} - T_e)}{2\Delta x} - A(T_w - T^*) \quad (3)$$

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{u(T_w - \bar{T})}{2\Delta x} - A(T_e - T^*) \quad (4)$$

Las ecuaciones (2) a (4) constituyen el modelo climático del micromundo; su solución numérica se realizó usando el método de integración Runge-Kutta 4. Los valores iniciales requeridos para la solución numérica son presentados en las ecuaciones (5) a (10). En la Gráfica 2 se presenta el resultado de una simulación a 20 años de la diferencia de las temperaturas Este y Oeste.

$$U = -0,45m \frac{m}{s} \quad (5)$$

$$B = 63072000 \frac{m^2}{s^2 \cdot \text{año} \cdot ^\circ C} \quad (6)$$

$$A = 1,3 \frac{1}{\text{año}} \quad (7)$$

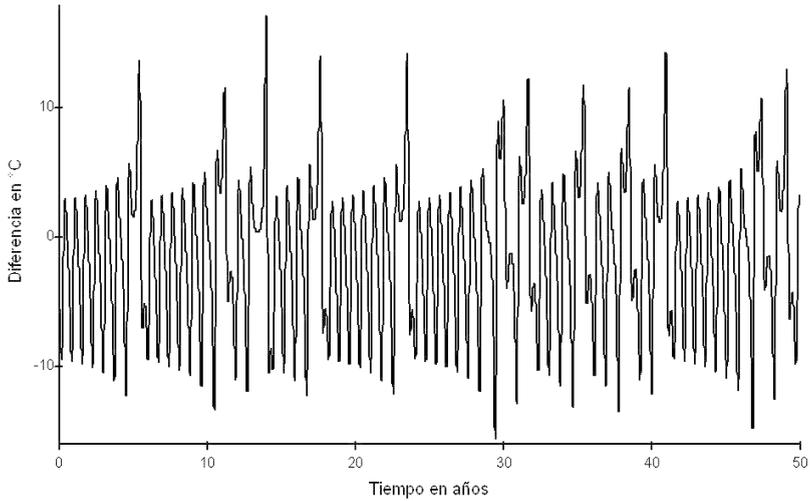
$$\Delta X = 7500000m \quad (8)$$

$$\bar{T} = 0^\circ C \quad (9)$$

$$T^* = 12^\circ C \quad (10)$$

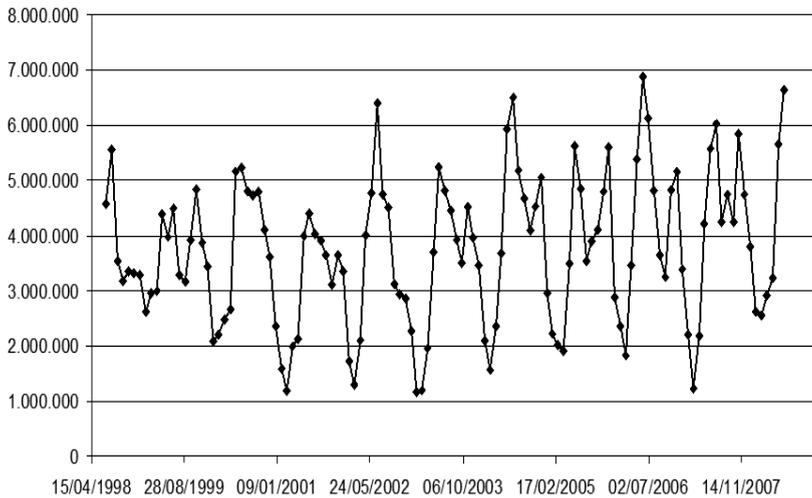
En la Gráfica 3 se puede observar el comportamiento de los aportes hidrológicos totales para los generadores hidráulicos que participan de la bolsa de energía del Mercado Mayorista de Electricidad colombiano para el periodo comprendido entre junio de 1998 y junio de 2008. De manera cualitativa se puede apreciar una similitud entre las Gráficas 2 y 3. Como se puede observar, el modelo climático genera el comportamiento oscilatorio y aperiódico que caracteriza al fenómeno. La importancia del modelo climático para este trabajo radica en que en el mundo real los agentes se enfrentan a un clima en constante cambio, así que es necesario que estén capacitados para tomar decisiones adecuadas en estos escenarios.

GRÁFICA 2.
RESULTADO DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL MODELO CLIMÁTICO PARA
UN HORIZONTE DE 20 AÑOS



Fuente: elaboración propia.

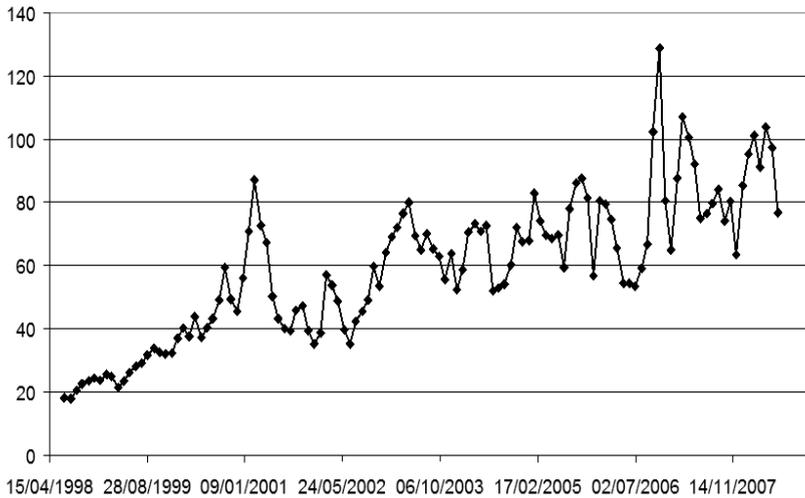
GRÁFICA 3.
APORTES HISTÓRICOS AL SISTEMA HIDRÁULICO DE GENERACIÓN EN MWH



Fuente: Sistema Neón, XM S.A. E.S.P. (www.xm.com.co).

En la Gráfica 4 se muestra el comportamiento del precio promedio mensual de la electricidad en la Bolsa de Energía del Mercado Mayorista colombiano. Cabe resaltar que el precio de bolsa no solo es influenciado por los aportes hidrológicos, sino también por fenómenos macroeconómicos como el crecimiento o disminución del PIB y la inflación (Gerencia de Información y Servicios ISA S.A. E.S.P, 1999); en todo caso, puede apreciarse la influencia retardada que ejercen los aportes sobre el precio de bolsa.

GRÁFICA 4.
EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS PRECIOS DE BOLSA EN \$/KWH



Fuente: Sistema Neón, XM S.A. E.S.P. (www.xm.com.co).

En un mercado con una alta proporción de generadores hidráulicos, los precios de la electricidad en la bolsa se ven directamente afectados por la variabilidad de los aportes hidrológicos y, particularmente, por eventos extremos como el fenómeno de El Niño. Como consecuencia de ello, en condiciones hidrológicas normales y de aportes abundantes, la demanda es abastecida por las plantas hidráulicas y los precios de la electricidad permanecen bajos. Al presentarse hidrologías secas, la generación hidráulica se reduce y el faltante de electricidad para abastecer la demanda debe ser generada por plantas térmicas a un costo mucho mayor.

En virtud de lo anterior, los generadores perciben ingresos bajos o nulos –debido al bajo precio de la electricidad en la bolsa o a que no son requeridos en condiciones normales o húmedas– y, esporádicamente, perciben ingresos altos debido a los altos costos de la generación realizada por las plantas térmicas cuando ocurren eventos extremos secos. Esta situación es poco atractiva para realizar nuevas

inversiones en capacidad, por lo que ha sido necesaria la implementación de mecanismos económicos que compensen al inversionista por tener una capacidad instalada de generación que solo es requerida cuando ocurren eventos extremos. Ejemplos de dichos mecanismos económicos en el Mercado Mayorista de Electricidad de Colombia son el *cargo por confiabilidad* y las *obligaciones de energía firme* (Comisión de Regulación, 2008).

Precios de oferta

En el micromundo se pueden presentar dos tipos de agentes generadores de electricidad: los hidráulicos y los térmicos; estos últimos se dividen a su vez en térmicos a carbón y térmicos a gas, mientras que los generadores hidráulicos se clasifican por su capacidad de regulación, la cual puede ser de 3, 6 o 12 meses. Los precios de oferta de los generadores térmicos serán sus costos variables junto a un ruido aleatorio que proporciona variabilidad; se usan los costos variables ya que este sería el precio competitivo de su generación (Stoft, 2002).

Para la generación de precios de oferta de los generadores hidráulicos, se calcularon las dependencias no lineales de estos con algunas variables internas del sistema, las cuales son: aportes hidrológicos al generador, aportes hidrológicos al sistema, vertimientos del generador, vertimientos del sistema, nivel de embalse del generador, nivel de embalse del sistema y los precios de oferta y de bolsa de los periodos anteriores.

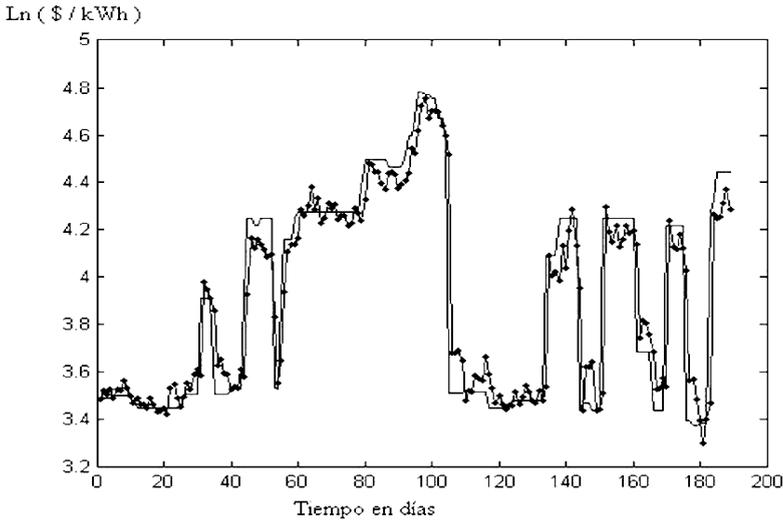
Para el cálculo de las dependencias se utilizó la metodología descrita por Martínez y Velásquez (2011), la cual permitió determinar qué rezagos de las variables del sistema tenían más influencia sobre los precios de oferta.

Posteriormente, se elaboró una red neuronal artificial tipo perceptrón multicapa para cada tipo de regulación que puede tener un generador hidráulico dentro del micromundo. Así, el perceptrón multicapa calcula la oferta de un generador para el siguiente trimestre con base en la información actual del sistema, que está constituida por las variables respecto a las cuales el precio de oferta mostró una alta dependencia. Tanto para la determinación de las correlaciones no lineales como para el entrenamiento y la validación del perceptrón multicapa se preparó un conjunto de datos a partir de la información correspondiente a los generadores hidráulicos más representativos del Mercado Mayorista de Electricidad colombiano.

En la Gráfica 5 se presentan los resultados obtenidos para la validación del perceptrón multicapa, el cual fue entrenado con los datos de la central hidroeléctrica de Playas (que cuenta con una capacidad instalada de 201 MW y un embalse con una capacidad de almacenamiento equivalente a 137.130 MWh). La línea continua corresponde a los precios de oferta reales, mientras que la línea punteada corresponde a los precios de oferta generados por el perceptrón multicapa. Para la construcción del modelo también se tuvieron en cuenta los datos de las siguientes centrales: Guatapé, Salvajina, San Carlos, Chivor, Guavio, Prado, Jaguas y

Tasajera. La elección de estas centrales se debió principalmente a que constituyen una representación significativa del mercado colombiano y a la cantidad de datos disponibles para ajustar el modelo.

GRÁFICA 5.
PRECIOS REALES Y SIMULADOS USANDO UN MODELO DE REDES NEURONALES PARA GENERAR LOS PRECIOS DE OFERTA DE UNA CENTRAL HIDRÁULICA CON EMBALSE ASOCIADO



Fuente: elaboración propia.

Las variables de entrada de cada perceptrón multicapa son: vertimientos, aportes, demanda esperada y los rezagos de los precios de oferta. En total cada perceptrón recibe 46 datos de entrada, teniendo en cuenta las variables y sus rezagos. Existen otras variables que afectan el precio de oferta, pero, para lograr el objetivo de que el micromundo no esté atado a un mercado en particular, se requiere que los datos que constituyen la entrada del modelo de ofertas se generen endógenamente.

Cada perceptrón multicapa posee una capa oculta con cinco neuronas, las cuales tienen una función de activación de tangente hiperbólica y una capa de salida de una neurona que usa una función de activación lineal. Después de su entrenamiento y validación, cada perceptrón multicapa se incorpora a la aplicación informática y se utiliza con los datos generados endógenamente por el micromundo. Cabe resaltar que el micromundo no está atado al mercado colombiano, ya que se puede configurar para simular diferentes escenarios; los datos de la bolsa colombiana solo se usaron para el diseño de los agentes contra los que debe competir el usuario.

VALIDACIÓN DEL MODELO

Para la validación del micromundo se siguió el enfoque propuesto por Sterman (2000), según el cual un modelo debe ser validado principalmente en su estructura y comportamiento. Sterman (2000) propone la validación de los modelos en cuatro aspectos: propósito, pertinencia y límites; estructura física y de decisiones; robustez y sensibilidad, y políticas y prácticas en el uso del modelo. A continuación se presentan los resultados de la validación del micromundo en cada uno de estos aspectos.

Propósito, pertinencia y límites

En este primer aspecto se busca definir el alcance del modelo y sus objetivos. Se realiza para mostrar al usuario qué puede esperar del modelo.

El propósito del micromundo presentado en este artículo es ser una herramienta pedagógica que enseñe al usuario los aspectos fundamentales acerca de la operación de una *bolsa de energía con despacho centralizado*. El micromundo se centra en la bolsa y no implementa el sistema de contratos que brinda cobertura a los generadores; esto se realiza para que el usuario se concentre en la bolsa, se exponga a los riesgos y aproveche las oportunidades del mercado, pues, a pesar de que el volumen transado en la bolsa es bajo, ya se desarrolló una herramienta similar para los contratos de energía (Dyner *et al.*, 2008).

Para la elaboración del micromundo era pertinente usar una metodología que resaltara la importancia de los componentes internos del sistema, ya que, a pesar de que hay una influencia de factores externos como el clima o variables macroeconómicas, son los mismos agentes que participan en la bolsa los que determinan su comportamiento. El micromundo tiene en cuenta algunos de los factores externos, por ejemplo, el clima, pero le da mayor relevancia a la interacción de los agentes por medio del precio de oferta.

Estructura física y de decisiones

En este aspecto se pretende verificar que el modelo obedezca a las leyes físicas básicas como la conservación de materia y energía; también se pretende verificar que el modelo sea consistente en sus unidades. En la estructura de decisiones se busca validar que las ecuaciones usadas para el modelamiento de la toma de decisiones sean las adecuadas.

Para la realización de este trabajo, se validó que el modelo fuera físicamente consistente, se verificó el uso de las unidades, especialmente las de energía y potencia, y se revisó la consistencia dimensional de las ecuaciones. Respecto a la estructura de decisiones, se elaboró una red neuronal entrenada para simular el comportamiento de un generador del mercado colombiano; la red neuronal presenta un

error cuadrático medio de 0,0272, lo que significa que producirá resultados similares a los expuestos por un generador real sometido a los mismos estímulos del mercado.

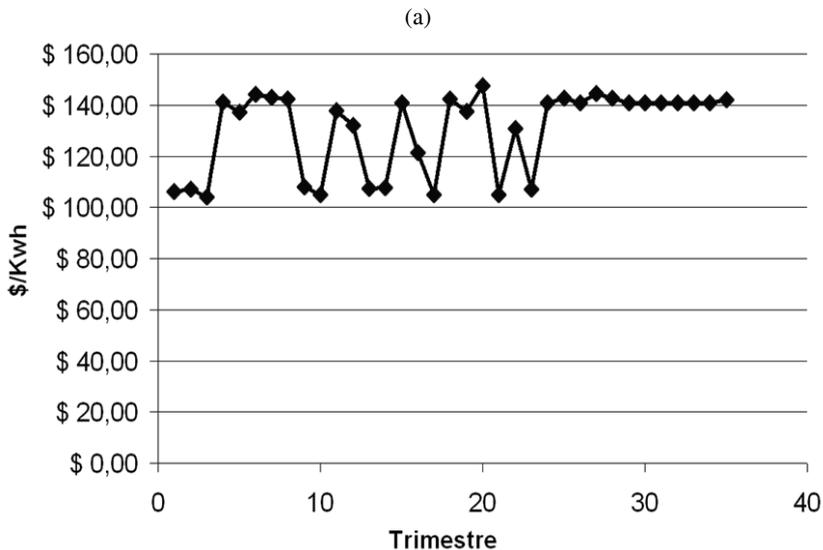
Robustez y sensibilidad

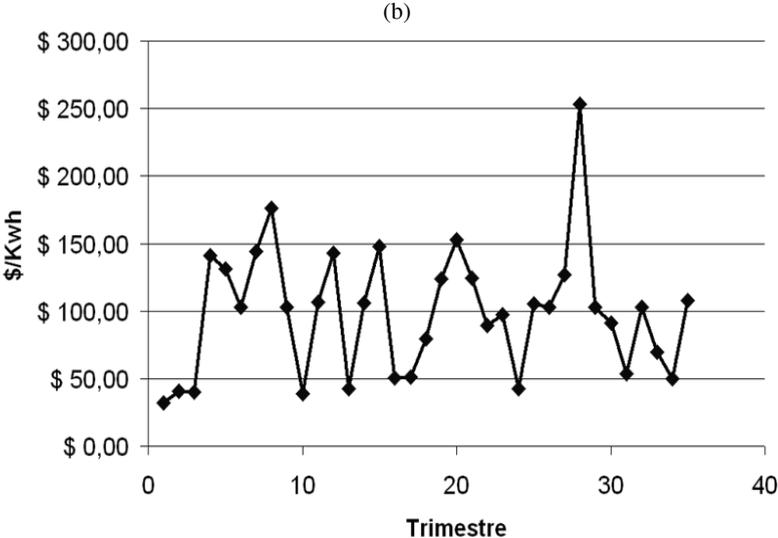
Con relación a este aspecto, se verifica el comportamiento del modelo bajo condiciones extremas y se analiza su sensibilidad a la variación de los parámetros.

En la Gráfica 6 se muestra el precio de la electricidad en la bolsa bajo dos escenarios diferentes. En el escenario (a) se presenta un predominio de generadores hidráulicos y en el escenario (b) predominan los generadores térmicos. Como se puede ver, el precio de bolsa presenta una mayor variación en el escenario (a); esto es consistente con los supuestos del modelo, ya que, si hay una abundancia de generadores térmicos, el precio de bolsa no será tan dependiente de los aportes hidrológicos; por el contrario, si hay una abundancia de generadores hidráulicos, habrá una alta volatilidad en bolsa, debido a la variación de los aportes hidrológicos.

A pesar de ser consistente con los supuestos del modelo, estos resultados ilustran una debilidad del micromundo, ya que en la realidad los precios de oferta de los generadores térmicos dependen de los precios de los combustibles en los mercados externos donde los precios de bolsa no tienen un comportamiento regular como el que se muestra en la Gráfica 7.

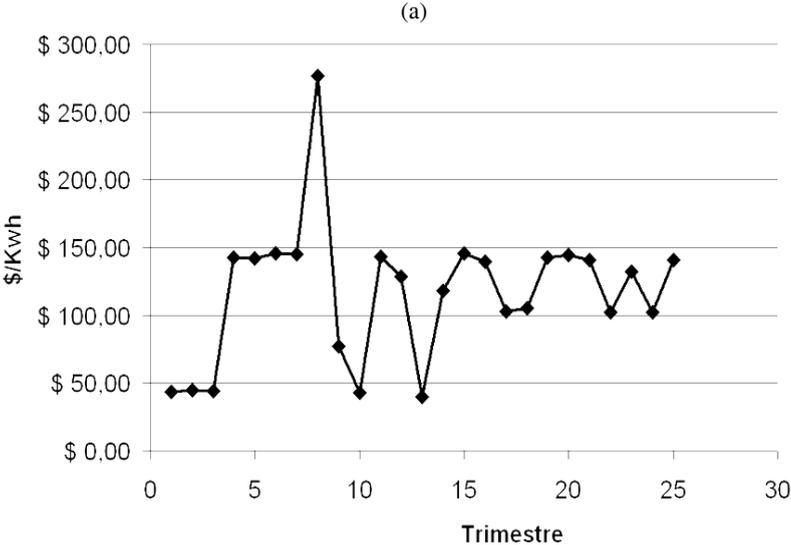
GRÁFICA 6.
RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN BAJO DIFERENTES ESCENARIOS

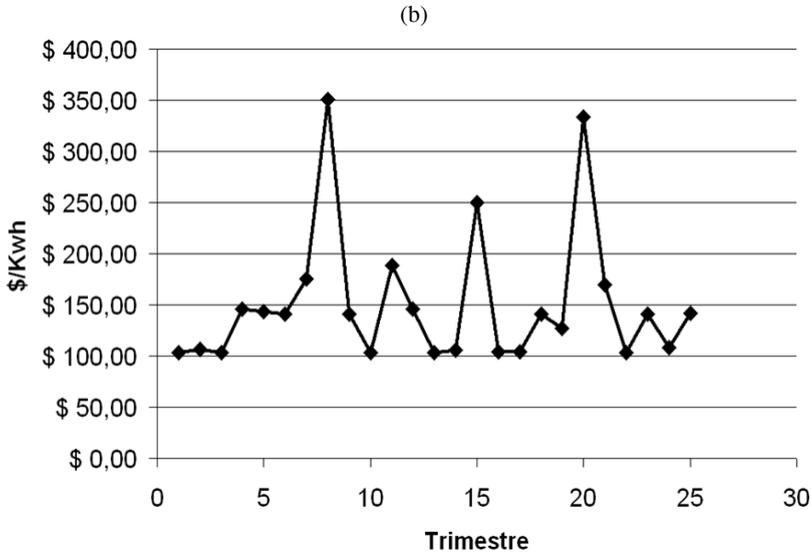




Fuente: elaboración propia.

GRÁFICA 7.
RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN BAJO DIFERENTES ESCENARIOS DE DEMANDA





Nota. Promedio para la primera gráfica \$/kWh 117,32 y para la segunda 151,3.

Fuente: elaboración propia.

En la Gráfica 7 se muestra el precio de bolsa bajo dos escenarios que solo se diferencian en su demanda. El escenario (a) simula una demanda de potencia de 1050 MW (la demanda permanece en este valor durante todo el trimestre) y el escenario (b) simula una demanda de potencia de 1150 MW. Como se puede apreciar, el precio de bolsa promedio durante toda la simulación fue mayor en el escenario (b); esto es consistente con las bases microeconómicas sobre las que se construye una bolsa, ya que, al haber una mayor demanda y permanecer igual la oferta, sube el precio (Varian, 1999).

Prácticas en el uso del modelo

Con relación a este aspecto, se dan las indicaciones de cómo debe ser usado el modelo y en dónde se puede encontrar información acerca de este.

El micromundo presentado en este trabajo debe ser visto como una herramienta pedagógica; no debe ser usado como una herramienta de predicción, ya que las simplificaciones sobre las que está construido le impiden arrojar resultados precisos. El micromundo está dirigido a una audiencia que no tiene conocimientos profundos acerca del esquema de bolsa de energía, pero que posee nociones microeconómicas básicas; se recomienda su uso en conjunción con un curso introductorio al funcionamiento de los mercados de energía.

RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos al realizar una simulación bajo las condiciones ilustradas en los Cuadros 1, 2 y 3. La Gráfica 8 presenta los precios de oferta obtenidos de un generador hidráulico del micromundo con una capacidad instalada de 300 MW y con un embalse de regulación semestral.

CUADRO 1.
PARÁMETROS DE LOS GENERADORES HIDRÁULICOS

Generador	Capacidad instalada (MW)	Regulación del embalse (meses)
1	150	6
2	200	12
3	180	6
4	150	6
5	300	12
6	220	6
7	180	3
8	170	6
9	300	3
10	250	3

Fuente: elaboración propia.

CUADRO 2.
PARÁMETROS DE LOS GENERADORES TÉRMICOS

Generador	Capacidad instalada (MW)	Tecnología
1	300	Gas
2	100	Carbón
3	200	Gas
4	170	Carbón
5	150	Gas

Fuente: elaboración propia.

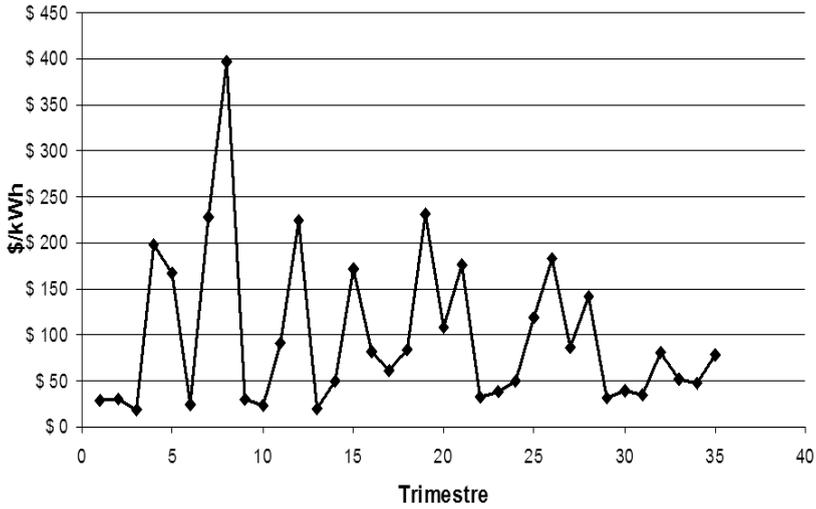
CUADRO 3.
PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN

Parámetro	Valor
No de trimestres	20
Demanda de potencia (MW)	2000
Crecimiento anual de la demanda (%)	1,5
Generadores hidráulicos	10
Generadores térmicos	5
Tasa anual de interés	10 %
Tipo de jugador	Hidráulico
Penalización por racionamientos	Activa

Fuente: elaboración propia.

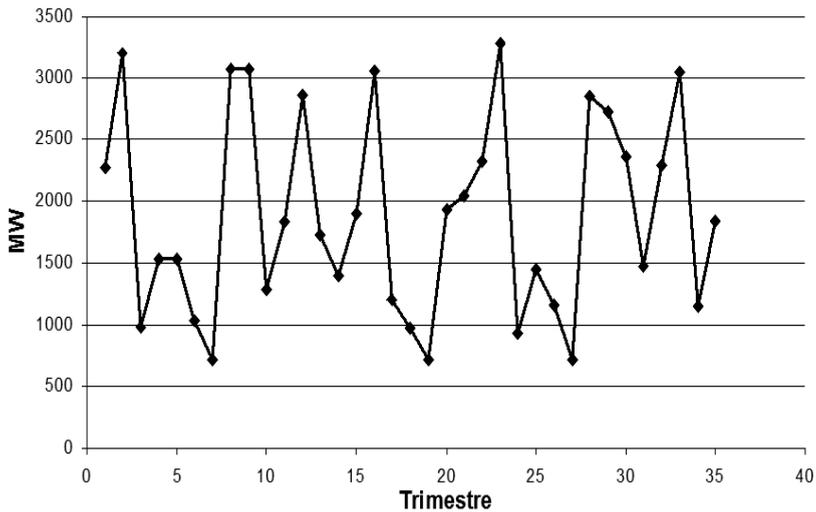
En la Gráfica 9 se presentan los aportes hidrológicos al sistema. Se observa que hay periodos con el fenómeno de El Niño y otros con el de La Niña.

GRÁFICA 8.
PRECIOS DE OFERTA DE UN GENERADOR HIDRÁULICO



Fuente: elaboración propia.

GRÁFICA 9.
APORTES AL SISTEMA

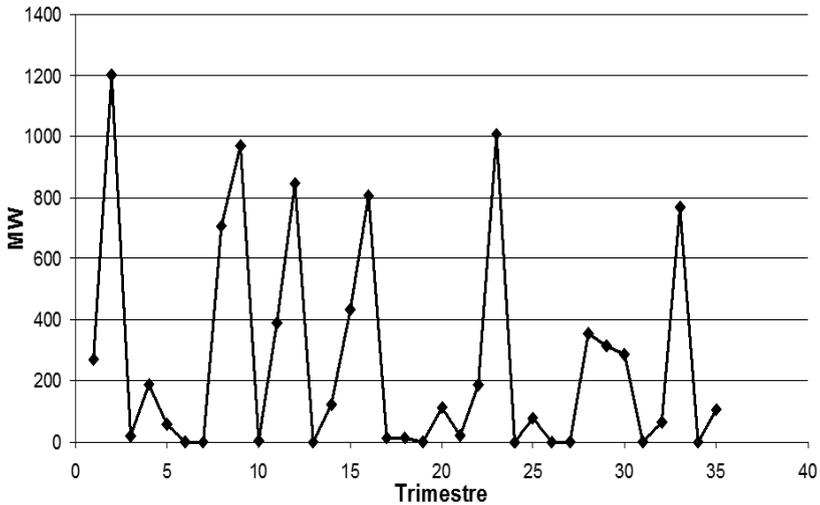


Fuente: elaboración propia.

Se puede apreciar que el sistema se comporta en forma similar a una bolsa de energía con alta dependencia del componente hidráulico, lo que se ve reflejado en la gran variación de los precios de oferta. Observe como la Gráfica 9 presenta en el trimestre 8 una baja en los aportes hidrológicos, lo que ocasiona que el precio de oferta de los generadores hidráulicos se incremente (Gráfica 8).

En la Gráfica 10 se presentan los vertimientos del generador de la Gráfica 8, se observa la alta dependencia de estos con los aportes al sistema y cómo estos influyen el precio de oferta del generador. Esto se debe a que los vertimientos significan energía que se pudo haber generado pero se desechó. Si un generador está presentando vertimientos significa que tiene su embalse lleno, cabría esperar entonces que su precio de oferta disminuyera, pues vender energía a bajo precio es una mejor opción que desaprovecharla.

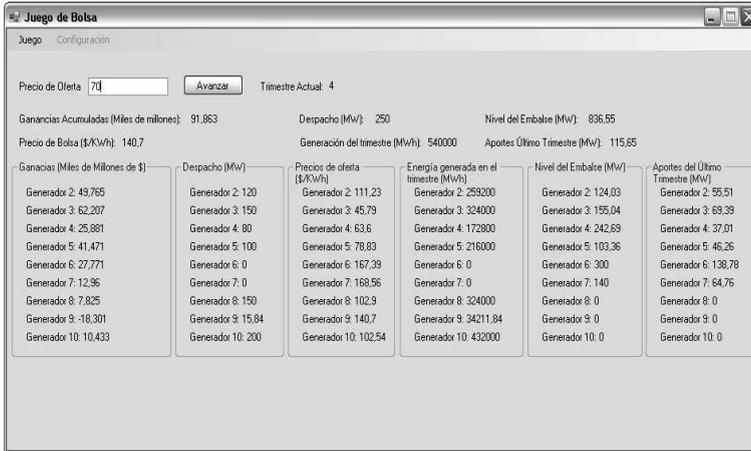
GRÁFICA 10.
VERTIMIENTOS DE UN GENERADOR



Fuente: elaboración propia.

En la Gráfica 11 se presenta la interfaz gráfica durante una corrida típica del micromundo. En ella se presentan: el precio de bolsa del trimestre anterior, las ganancias monetarias acumuladas para cada central hasta el periodo actual, el despacho en potencia y en energía que tuvo cada central durante el trimestre anterior, los aportes hidrológicos en potencia y el nivel del embalse al final del periodo anterior. Durante un juego, el participante debe decidir los precios de la electricidad que ofertara en bolsa para cada uno de los trimestres que dure el juego. Como resultado, la herramienta genera un reporte financiero y uno hidrológico, que resumen los resultados de la operación hasta el momento actual.

GRÁFICA 11. INTERFAZ GRÁFICA DURANTE UNA CORRIDA TÍPICA



Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Se diseñó y desarrolló un micromundo para el entrenamiento de agentes de una bolsa de energía en un mercado liberalizado basado, principalmente, en generación hidráulica. El modelo desarrollado representa las relaciones entre las variables económicas y físicas que determinan el precio de bolsa. En dicho modelo, el usuario fija sus precios de oferta para cada periodo de tiempo durante la simulación, mientras que el sistema simula las ofertas de otros usuarios en el mercado. Como resultado final, se generan precios de bolsa y se calcula el resultado financiero de la operación en bolsa de todos los usuarios. A través del juego, el usuario puede comprender y entender de una forma más clara los resultados de sus acciones en términos de su desempeño financiero. La validación realizada permite concluir que el sistema captura un comportamiento similar al mercado real, en cuanto al comportamiento de las principales variables físicas que dictaminan su estado, así como en términos de la volatilidad de los precios.

Los modelos que componen el micromundo se interrelacionan y generan un comportamiento que simula los principales aspectos fundamentales del mundo real. Por ejemplo, en el caso del modelo climático se da una alta volatilidad debida a la impredecibilidad a largo plazo del clima, lo que influencia las decisiones que toman los agentes que dependen de recursos hídricos para la generación de energía; además, el micromundo obedece las leyes de oferta y demanda sobre las que se diseñan las bolsas de energía con despacho centralizado. A pesar de lo anterior, el micromundo no debe ser utilizado como herramienta de predicción del comportamiento de un mercado en particular, ya que este no es su fin.

Para una adecuada toma de decisiones por parte de los agentes de la bolsa, es necesario que estos apliquen sus conocimientos y analicen las consecuencias que tienen sus decisiones. Realizar esta experimentación en la vida real es arriesgado y costoso debido a los grandes volúmenes de dinero que se manejan en la bolsa de energía. Debido a lo anterior, el micromundo desarrollado busca ser una herramienta pedagógica que agilice el proceso de aprendizaje de los agentes mediante la experimentación en un entorno virtual; las ventajas principales de este enfoque son una mayor libertad en la experimentación y una rápida realimentación. Lo anterior se justifica debido a la mayor flexibilidad y el menor costo de experimentación asociados a un entorno virtual en lugar de uno real.

Como trabajo futuro se requiere:

- El desarrollo de talleres basados en el uso de la herramienta, con el fin de evaluar su desempeño y sus virtudes y debilidades como herramienta pedagógica. Estos serán desarrollados en el marco del programa académico de Especialización en Mercados de Energía de la Universidad Nacional de Colombia, cuyos estudiantes provienen mayoritariamente de firmas del sector eléctrico colombiano.
- Incorporar mecanismos para que el jugador pueda presentar ofertas independientes y simultáneas en bolsa para un conjunto de plantas generadoras de su propiedad.
- Evaluar otros modelos hidrológicos alternativos que permitan una representación más real de los aportes del sistema y su variabilidad.
- Mejorar los mecanismos de representación de los agentes competidores del sistema, de tal forma que su comportamiento pueda controlarse mediante parámetros en la simulación.
- Mejorar el sistema para que el usuario pueda representar su estrategia de comercialización de energía tanto en bolsa como en contratos de largo plazo para su portafolio de plantas. En EnerBiz se considera que el agente es solo comercializador y no posee plantas de generación. Con la modificación propuesta, se plantea el caso de un generador-comercializador.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Comisión de Regulación de Energía y Gas (2008). *Cargo por Confiabilidad*. Recuperado desde <http://www.creg.gov.co/cxc/>
2. Dyner, I., Larsen, E. y Franco C. J. (2008). Games for electricity traders: Understanding risk in a deregulated industry. *Energy Policy*, 37(2), 465-471.
3. Einhorn, M.A. (1994). *From Regulation to Competition: New frontiers in electricity markets*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
4. Gerencia de Servicios de Información ISA S.A. E.S.P. (1999). *Análisis del mercado mayorista de la electricidad en Colombia, 1998-1999*. Medellín: ISA S.A. E.S.P.
5. Martínez, C. A. y Velásquez, J. D. (2011). Análisis de dependencias no lineales utilizando redes neuronales artificiales. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 60, 182-193.

6. Morecroft, J. (2007). *Strategic Modelling and Business Dynamics: A feedback systems approach*. Chichester, England: John Wiley & Sons.
7. Papert, S. (1980). *Mindstorms: Children, Computers, and Powerful Ideas*. New York: Basic Books.
8. Senge, P.M. y Lannon, C. (1997). Managerial Microworlds. *Technology Review*, 93(5), 62-68.
9. Senge, P.M. (1990). *The Fifth Discipline: The Art and Practice of the Learning Organization*. New York: Doubleday.
10. Stoft, S. (2002). *Power System Economics: Designing Markets for Electricity*. Piscataway, NJ: Willey- IEEE Press.
11. Serman, J.D. (1992). Teaching takes off: flight simulators for management education. *OR/MS Today*, October, 40-44.
12. Serman, J.D. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Homewood, IL: Irwin / McGraw-Hill.
13. Vallis, G. K. (1986). El Niño: A chaotic dynamical system? *Science*, 232(4747), 243-245.
14. Varian, H. (1999). *Microeconomía intermedia*. Bogotá: Alfaomega.
15. Velásquez, J.D., Dyer, I. y Souza, R.C. (2007). ¿Por qué es tan difícil obtener buenos pronósticos de los precios de la electricidad en mercados competitivos? *Cuadernos de Administración*, 20(34), 259-282.
16. Velásquez, J.D. (2009). *Construcción de escenarios de pronóstico del precio de electricidad en mercados de corto plazo*. (Tesis Doctoral). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, CO.
17. Zaccour, G. (1998). *Deregulation of electric utilities*. Boston: Kluwer Academic Publishers.