

¿POR QUÉ ES TAN DIFÍCIL OBTENER BUENOS PRONÓSTICOS DE LOS PRECIOS DE LA ELECTRICIDAD EN MERCADOS COMPETITIVOS?*

Juan David Velásquez Henao^{**}

Isaac Dyner Resonsew^{***}

Reinaldo Castro Souza^{****}

* Este artículo es producto de la investigación realizada por los grupos Mercados Energéticos y Estadística Computacional y Análisis de Datos en el Modelado y la Predicción de Precios de Electricidad, patrocinado por la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. El artículo se recibió el 20-02-2006 y se aprobó el 29-11-2007.

** Candidato a Doctor en Ingeniería-Área Sistemas Energéticos; Magíster en Ingeniería de Sistemas, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, 1997. Profesor asociado de la Escuela de Sistemas, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Director del Grupo de Finanzas Computacionales, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. Correo electrónico: jdvelasq@unal.edu.co

*** Doctor en Ingeniería-Área Sistemas Energéticos, London University, Reino Unido, 1997; Magíster in Operations Research, University of Southampton, Reino Unido, 1974; Magíster in Statistics, University of Warwick, Reino Unido, 1979. Profesor titular de la Escuela de Sistemas, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Miembro del Grupo de Mercados de Energía, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. Correo electrónico: idyner@unal.edu.co

**** PhD in Statistics, University of Warwick, Reino Unido, 1979; Mestre em Sistemas de Engenharia Elétrica, Pontificia Universidade Católica, Rio de Janeiro, Brasil, 1974. Profesor titular de la Facultad de Engenharia Eletrica, Pontificia Universidade Católica, Rio de Janeiro, Brasil. Correo electrónico: reinaldo@ele.puc-rio.br

¿Por qué es tan difícil obtener buenos pronósticos de los precios de la electricidad en mercados competitivos?

RESUMEN

Los procesos de liberalización y desregulación alrededor del mundo han transformado las industrias eléctricas y provocado un comportamiento mucho más complejo de los precios. El artículo analiza las dificultades encontradas por los investigadores y profesionales cuando intentan pronosticar los precios de la electricidad, con el objetivo de contribuir a identificar las barreras más importantes para tal fin, en particular las relacionadas con la complejidad del mercado, las limitaciones humanas para procesar la información, las políticas organizacionales, los problemas metodológicos y las experiencias limitadas. También se formulan interrogantes útiles para definir investigaciones futuras sobre la predicción de precios.

Palabras clave: predicción, precios de la electricidad, modelos, series de tiempo.

Why is it so Difficult to Have Good Electricity Price Forecasting in Competitive Markets?

ABSTRACT

Liberalization and deregulation processes around the world have transformed electrical power industries and provoked a much more complex price behavior. This article analyzes the difficulties that researchers and professionals have encountered when they attempt to predict electricity prices, for the purpose of contributing to identifying the most important obstacles that hinder good forecasting, in particular, those related to market complexity, human limitations in information processing, organizational policies, methodological problems, and limited experiences. The article also poses some useful questions, to define future research on price forecasting.

Key words: Forecasting, electricity prices, models, time series.

Introducción

La importancia de la electricidad para el desarrollo económico e industrial de la sociedad es irrefutable. La energía es necesaria para muchas de las principales actividades de la sociedad, y los precios de la electricidad tienen un impacto importante en los costos de muchos bienes manufacturados. Esto motivó el desarrollo de una estructura monopolística, donde la industria fue organizada bajo un ciclo integrado y coordinado basado en la producción, la transmisión y el consumo, que permitió a las empresas de la industria usar modelos estructurales o basados en costeo para obtener estimaciones de sus costos futuros (Pilipovic, 1998).

Sin embargo, este sistema ha llevado al colapso a muchos sectores eléctricos que han sufrido las crisis causadas por el racionamiento y la falta de capacidad de inversión en generación. Las razones de esta crisis han sido ampliamente analizadas en la literatura; véanse, por ejemplo, los trabajos de Dyner (1998), Del Sol (2002), Jaccard (1995), Sanclemente (1993) y Organización Latinoamericana de Energía (Olade, 1991).

En razón de lo anterior, las últimas dos décadas se han caracterizado por procesos de desregulación y liberalización de diferentes monopolios estatales en el mundo. Steiner (2000) presenta una revisión general sobre este aspecto. En este nuevo escenario competitivo, se ha reconocido la necesidad de entender cómo las características del mercado y sus condiciones particulares afectan los precios y cómo los agentes pueden capitalizar este conocimiento para tomar mejores decisiones, relacionadas principalmente con la formulación de estrategias de comercia-

lización y de inversión en el corto, mediano y largo plazo.

De ahí que la evolución esperada de los precios sea un insumo fundamental en los procesos decisorios tanto operativos como estratégicos. Consecuentemente, este tema ha atraído mucha atención en los últimos años, y hay una gran cantidad de literatura reciente que evidencia los esfuerzos de los investigadores para pronosticar con mayor precisión los precios de la electricidad, así como la dificultad para realizar dicha tarea.

El problema de la predicción de precios de la electricidad difiere en gran medida respecto a la predicción de precios en otros tipos de mercados, debido a las particularidades propias de la electricidad, por lo que amerita una investigación que ayude a clarificar y a entender las razones de dicha problemática. Este artículo analiza las barreras que enfrentan los investigadores y profesionales cuando se pronostican los precios de la electricidad en mercados competitivos; se discute el comportamiento de los precios en los mercados en libre competencia, y se señala cómo los aspectos relacionados con la complejidad del mercado, las limitaciones humanas para el procesamiento de información, las políticas organizacionales, los problemas metodológicos y las experiencias limitadas dificultan la predicción de los precios en mercados competitivos.

El primer aporte que se persigue con esta investigación es presentar de una manera ordenada, coherente y completa una caracterización de los precios de la electricidad en mercados competitivos desde la economía y la estadística, con el fin de presentar un marco unificador que permita entender

de qué manera se comportan los precios y qué aspectos los influyen, ya que este es un insumo fundamental para la predicción. El segundo aporte de este trabajo es presentar un análisis crítico sobre las experiencias reportadas en la literatura acerca de la predicción de precios de la electricidad a partir de las metodologías utilizadas. El tercer aporte está relacionado con analizar las diferentes complejidades que se deben enfrentar a la hora de preparar los pronósticos. Ellas están relacionadas con aspectos técnicos, humanos y aquellos propios de la tarea particular abordada.

Para alcanzar los objetivos propuestos, el resto de este artículo está organizado como sigue. En la sección 1 se caracteriza el comportamiento de los precios de la electricidad; en la sección 2 se analiza cuál es la importancia de la predicción de precios para los agentes; seguidamente, en la sección 3 se reportan las principales experiencias encontradas en la literatura. Posteriormente, la sección 4 está dedicada a discutir las barreras que dificultan la predicción. Por último, se concluye.

1. Caracterización de los precios de la electricidad

En este nuevo ambiente competitivo, los precios de la electricidad, como característica fundamental del mercado, reflejan la interacción imperfecta y compleja entre las fuerzas de la oferta y la demanda, mientras la regulación promueve las reglas para preservar la competencia. En esta sección se presenta la caracterización de los precios de la electricidad desde el análisis fundamental y el análisis estadístico.

1.1 *Análisis fundamental o económico*

El análisis fundamental se basa en el estudio y la caracterización de los factores que gobiernan la evolución de los precios; esto es, se basa en el análisis de la interacción entre las fuerzas de la oferta y la demanda, bajo el marco de referencia que da la regulación del mercado; una de sus utilidades primordiales es la construcción de modelos que permitan simular el comportamiento del mercado para analizar situaciones específicas.

Una excelente recopilación sobre las principales técnicas para el modelado de mercados eléctricos es presentada por Ventosa, Baillo, Ramos y Rivier (2005). Aunque desde la economía podrían analizarse los factores en la oferta y la demanda, resulta más interesante un análisis a partir de las condiciones físicas del mercado, así como las decisiones de negocio de los agentes y del manejo del mercado por parte del regulador.

1.1.1 *Influencia de las características físicas*

En el lado de la oferta, la electricidad debe ser generada para atender la demanda instantánea, ya que es imposible almacenar energía a bajo costo. Esto implica que el mercado debe tener suficientes activos de generación para satisfacer el consumo pico durante el día, mientras algunos de estos activos permanecen inactivos cuando el consumo base es atendido. Esto contrasta con la producción de muchos bienes físicos que es realizada a lo largo del día, y que se almacena para ser vendida cuando es demandada.

Así, las características de producción de la electricidad, más las limitaciones de almacenamiento, inducen una importante diferenciación con respecto a los mercados tradicionales. De este modo, la oferta debe responder rápido a las variaciones de la demanda, ya que el déficit en la producción causa picos instantáneos en los precios, los cuales retornan usualmente a niveles normales muy rápido. La diversidad de tecnología en los activos de generación induce diferencias importantes en la estructura de los costos de producción entre mercados de electricidad; así mismo, los avances en el uso de energía renovables o alternativas y las ganancias en la eficiencia para las tecnologías existentes causan importantes variaciones; este es un riesgo importante para los generadores marginales.

La salida de servicio de los activos de generación o transmisión, ya sea forzada o programada, introduce cambios en la oferta de electricidad que afectan directamente los precios. Sólo la indisponibilidad programada puede ser tenida en cuenta, ya que la forzada es causada por eventos impredecibles, como daños y fallas en los equipos. Para aquellos mercados basados principalmente en hidroelectricidad, el clima induce variaciones importantes en la capacidad efectiva de generación, causando variaciones estacionales en los precios. Estaciones climáticas muy secas inducen precios extremadamente altos, ya que la demanda debe ser atendida por unidades térmicas costosas; mientras que la abundancia de agua abarata los costos, puesto que dichas unidades térmicas se hacen innecesarias.

La demanda también es afectada por varios factores complejos. El consumo de elec-

tricidad es caracterizado por la presencia de muchos patrones cíclicos. Ellos están asociados con las estaciones del año, los días festivos y de trabajo, las horas de luz, así como otros efectos calendario. Las condiciones climáticas, especialmente la temperatura, tienen una influencia directa en el uso de los equipos domésticos, como aires acondicionados, ventiladores o calefacciones. Por otra parte, hay muchos esfuerzos para reducir las tasas de crecimiento de la demanda, los cuales incluyen: los programas para el uso eficiente de la electricidad, los desarrollos para el ahorro de energía en equipos domésticos y maquinaria industrial, los programas gubernamentales para reducir las necesidades de energía en el sector público y, finalmente, la modificación de los patrones de consumo.

El sistema de transmisión está conformado por los mecanismos físicos para llevar la electricidad desde las plantas de generación hasta los centros de consumo. La capacidad y los límites térmicos y de estabilidad de las líneas de transmisión imponen restricciones sobre la generación efectiva de las unidades.

1.1.2 Influencia de las decisiones de negocio

La liberalización de la industria de la electricidad se fundamenta en el desacople de las actividades de negocio en el mercado, de tal forma que cada agente actúe de forma descentralizada y bajo sus propios intereses. Así, las unidades estratégicas de cada agente deben definir los objetivos y las estrategias de largo plazo, mientras que las unidades operativas deben tomar acciones e implementar planes para alcanzar dichos objetivos.

No obstante, las decisiones tomadas son imperfectas, por lo que sus resultados parciales deben ser monitoreados, con el fin de corregir las acciones realizadas e implementar nuevas acciones que permitan a cada agente alcanzar sus objetivos organizacionales. En este nuevo paradigma, las decisiones descentralizadas tomadas por las compañías de generación, por los distribuidores, por los transmisores y por los administradores de mercado influyen el mercado mismo y, por ende, el comportamiento de los precios de la electricidad.

La toma de decisiones para los agentes es muy difícil, debido a que los mercados eléctricos liberalizados pueden considerarse ambientes complejos que cambian rápidamente (Sterman, 2000), ya que:

- Presentan una complejidad dinámica, por su cambio constante, al igual que muchos otros mercados en el mundo.
- La oferta, la demanda y la regulación interactúan constantemente entre sí, generando un proceso continuo de realimentación que modifica el sistema.
- Las acciones de cada agente inducen usualmente no linealidades en el sistema, y sus efectos pueden ser amplificadas en el tiempo.
- Existe una dependencia de la historia reciente, ya que las acciones de los agentes son prácticamente irreversibles.
- De acuerdo con la capacidad de adaptación de cada agente, algunos podrían tener temporalmente una posición dominante que afecte la evolución del mercado. Esto es particularmente importante en el caso del regulador.

Los seres humanos poseen sesgos y limitaciones propios de su naturaleza que les impiden entender la dinámica del mercado de una forma completa y perfecta (Hogarth, 1994). Consecuentemente, la supervivencia de las organizaciones en el largo plazo está determinada por la velocidad que tengan para reaccionar ante los cambios del mercado, así como por su capacidad de aprendizaje y adaptación (van der Heijden, Bradfield, Burt y Wright, 2002), para asimilarlos y corregir sus acciones en pro de los objetivos organizacionales.

1.1.3 *Influencia de la regulación*

La regulación establece las reglas para la operación del mercado en la persecución de la eficiencia económica, pues busca reducir la posibilidad de arbitraje y promover la competición entre las firmas (Stoft, 2002). La regulación establece pautas sobre aspectos como los siguientes:

- Los impuestos a los que están sometidos los agentes del mercado.
- La forma de ofertar (cuándo, cómo, en qué horizonte de tiempo, etc.).
- Los tipos de negociaciones, los agentes que pueden participar en ellas, etc.

La regulación tiene en cuenta la estructura particular del mercado (patrón de demanda, características del sistema de generación, tipo de tecnología, etc.) para cada región o país a la que es aplicada, de tal forma que se introduce una complejidad adicional, pues el diseño de mercado para una región particular no puede ser directamente implementado sin modificaciones en otras regiones.

1.2 *Análisis estadístico*

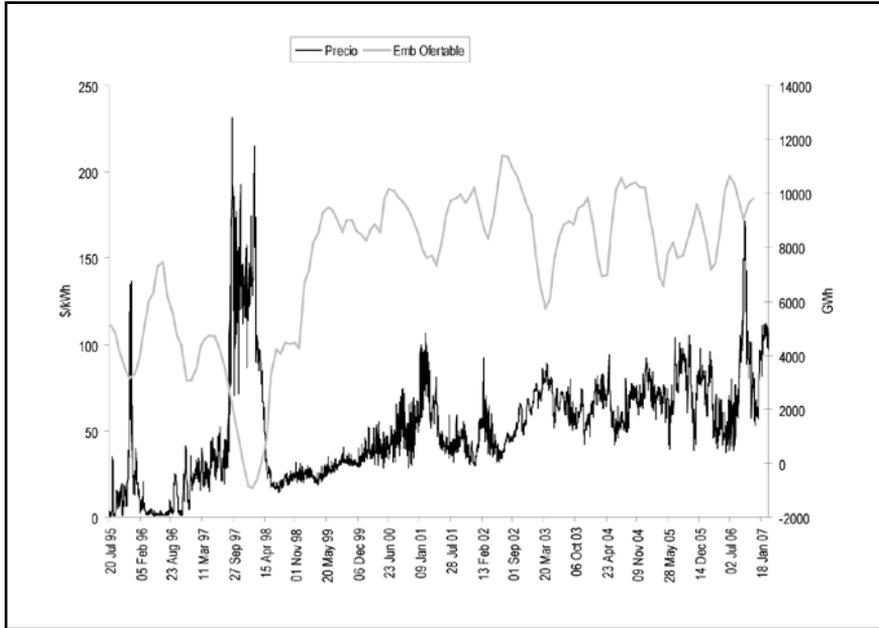
Los precios de la electricidad reflejan en su comportamiento la complejidad de las interacciones entre la oferta, la demanda y la regulación, ya que recogen la influencia de sus determinantes físicos, organizacionales y regulatorios. Los resultados de los análisis estadísticos reportados en la literatura indican que, en general, los precios de la electricidad presentan un comportamiento complejo, evidenciado por la presencia de:

- Pronunciados ciclos estacionales de periodicidad diaria, semanal, mensual y otros (Deb, Albert, Hsue y Brown, 2000), asociados con variaciones similares en los determinantes de los precios. Chan y Gray (2006) sugieren que estos ciclos influyen tanto la media de los precios como su volatilidad.
- Volatilidad variable en el tiempo y regiones de volatilidad similar (Knittel y Roberts, 2005)
- Fuertes variaciones de año a año, y de estación a estación (Vehviläinen y Pyykkönen, 2005).
- Estructura dinámica de largo plazo (Vehviläinen y Pyykkönen, 2005), debido a su inmadurez, entre muchos otros factores.
- Efectos de apalancamiento y respuesta asimétrica de la volatilidad a cambios positivos y negativos en los precios (véanse Knittel y Roberts, 2005; Mount, Ning y Cai, 2006).
- Valores extremos debido a la demanda instantánea insatisfecha (Knittel y Roberts, 2005).
- Correlaciones de alto orden, cambios estructurales, tendencias locales y reversión en la media (Knittel y Roberts, 2005).
- Diferentes determinantes para los riesgos en el corto, mediano y largo plazo (Parkinson, 2004).
- Una estructura de dependencia de las condiciones de las unidades de generación en el corto plazo, y de las inversiones en capacidad y la evolución en la demanda en el largo plazo (Pilipovic, 1998).

Por ejemplo, en el Gráfico 1 se presenta la evolución de los precios promedios diarios en la Bolsa de Energía del mercado eléctrico colombiano. Dicha serie exhibe:

- Fuertes variaciones de su dinámica año tras año, por ejemplo, la diferencia en la dinámica entre 1997 y 1998, o entre 1998 y 1999.
- Estructura dinámica en el largo plazo, que se evidencia por el cambio de dinámica año tras año.
- Valores extremos, por ejemplo, durante el fenómeno del Niño entre 1998 y 1999, debido a la escasez del recurso hídrico.
- Cambios estructurales, como el cambio de pendiente en el crecimiento de largo plazo de los precios ocurrido en el año 2001.

Gráfico 1
Precios promedios diarios en la Bolsa de Energía (mercado colombiano)
y evolución del embalse ofertable del sistema de generación



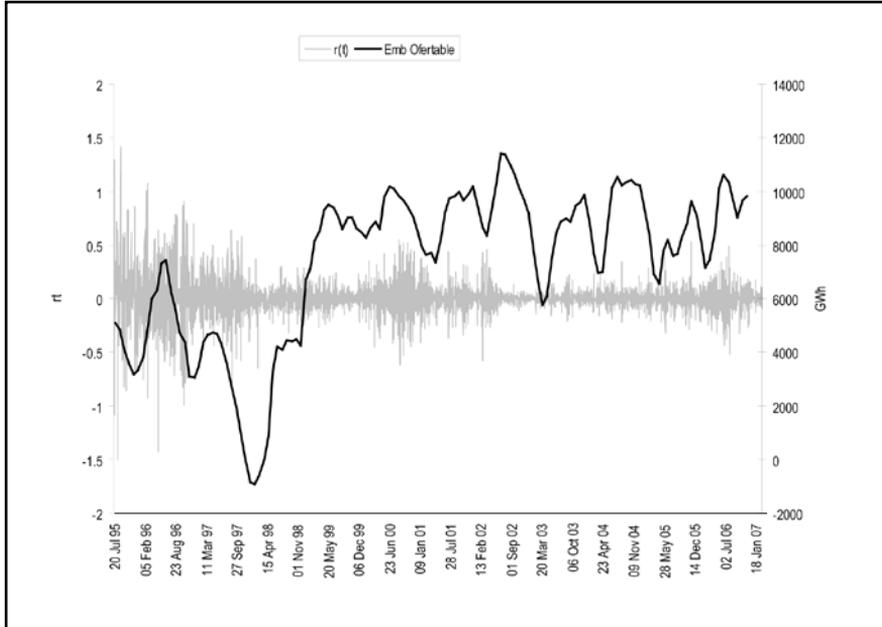
Fuente: Sistema Neón.

Su dinámica puede ser explicada, al menos en parte, por la evolución de algunas variables de mercado. Por ejemplo, en el Gráfico 1 se presenta la evolución del embalse agregado ofertable para el sistema de generación. La inspección visual muestra una clara dependencia entre el nivel de los precios y la abundancia o escasez del recurso hídrico, como la presencia del fenómeno del Niño (1998-1999).

Los precios diarios, igualmente, presentan cambios de volatilidad, tal como se ilustra en el Gráfico 2. En dicha figura se compara la evolución de los rendimientos diarios de los precios con la evolución del embalse

agregado ofertable. Se hace evidente la presencia de cambios de volatilidad de los precios y grupos de volatilidad similar, y su posible dependencia de la abundancia del recurso hídrico.

Gráfico 2
Rendimientos de los precios promedio diarios en la Bolsa
(mercado colombiano) y evolución del embalse agregado



Fuente: elaboración propia.

2. Necesidad del pronóstico de los precios

Es evidente la importancia de los pronósticos de los precios de electricidad, ya que todas las decisiones operativas y estratégicas de los participantes en el mercado son basadas en ellos (Hong y Lee, 2005):

- Los productores necesitan predicciones de corto plazo para formular estrategias de comercialización en el mercado de corto plazo y optimizar su programa de generación (Conejo, Contreras, Espinosa y Plazas, 2005); en el mediano plazo, para negociar contratos bilaterales favorables (Conejo et al., 2005), y en el largo plazo,

para la toma de decisiones relacionadas con el portafolio de activos de generación, la adquisición de nuevas plantas y el abandono de plantas existentes (Lu, Dong y Li, 2005; Angelus, 2001).

- Los distribuidores y los grandes consumidores necesitan predicciones de corto y mediano plazo para optimizar su operación, para negociar adecuadamente en el mercado de corto plazo y para realizar contratos bilaterales beneficiosos (Angelus, 2001).
- El administrador del mercado requiere buenos pronósticos para realizar un mejor manejo y planeamiento del mercado (Lu et al., 2005); más aún, el administrador está interesado en publicar sus

propias predicciones de los precios, ya que su tendencia es una señal para atraer nuevas inversiones.

3. Experiencias en el análisis y la predicción de precios de electricidad

Las relaciones entre los precios y sus determinantes (factores en la oferta, la demanda y la regulación) han sido bien entendidas en un contexto general (véase, por ejemplo, a Pilipovic, 1998). No obstante, las características particulares de cada mercado hacen que sea difícil, sino imposible, que se puedan plantear modelos determinísticos, generales y universalmente válidos que representen dicha relación.

Los casos reportados en la literatura más relevante se clasifican según su fin en modelos explicativos y en modelos predictivos. Los primeros buscan entender el comportamiento histórico de los precios, así como analizar sus propiedades; mientras los segundos están orientados exclusivamente a pronosticar su valor futuro, obviando muchos de los aspectos metodológicos que se tienen en cuenta en el modelado de series de tiempo. Los modelos reportados en la literatura se basan en el uso de:

- Técnicas estadísticas y de análisis de series de tiempo que permiten capturar las principales características de las series de precios y analizar su comportamiento. En ellas prima el uso de criterios estadísticos. En este grupo de técnicas se incluyen los modelos de Box y Jenkins, las redes neuronales artificiales y las técnicas de descomposición y filtrado.

- Análisis económico (o fundamental) de las fuerzas de la oferta y la demanda, que permite analizar la formación de los precios al considerar las condiciones de equilibrio del mercado y los determinantes de los precios. Este análisis puede ser cuantitativo o cualitativo. Este grupo comprende los modelos de optimización y los modelos de equilibrio del mercado, como Cournot.
- Métodos híbridos que combinan las aproximaciones anteriores. Los modelos de equilibrio son usados para representar el mecanismo de formación de los precios, y los modelos estadísticos de series temporales, para representar el comportamiento de los factores determinantes de los precios.

Angelus (2001); Deng (2000b); Deng (2000a); Ethier y Mount (1998); Ethier (1999); Knittel y Roberts (2001); Silva, Teixeira y Gomes (2001), y Davison, Anderson, Marcus y Anderson (2002), señalan diferentes aproximaciones para la representación de la dinámica de los precios en el mercado de excedentes, las cuales parten fundamentalmente de la noción de procesos de reversión de la media y de Poisson, aplicados principalmente a series de precios diarios.

Por otro lado, se han usado modelos de redes neuronales para el pronóstico de precios de la electricidad en Colombia (Velásquez y Dynner, 2001; Pulgarín, Smith y Poveda, 2001), España (Conejo et al., 2005), Inglaterra (Ramsay y Wang, 1998), Australia (Szkuta, Sanabria y Dillon, 1998), entre otros. Adicionalmente, Souza (2002) usa modelos de inteligencia computacional para modelar el precio *spot* en Brasil, mientras que Medeiros (2003) lo hace con sistemas difusos. Hong y

Hsiao (2001 y 2002) usan redes neuronales recurrentes en el modelado de precios en varios mercados desregulados.

3.1 Métodos estadísticos

Los métodos estadísticos se agrupan en procesos estocásticos continuos y discretos.

3.1.1 Procesos estocásticos continuos

En estos modelos se considera que los precios pueden obtenerse como la suma de diferentes componentes estocásticos diferenciales. Así, los precios (o el logaritmo de los precios) en el instante t (p_t) son obtenidos como la adición de un componente f_t que representa todos los patrones determinísticos, y un componente estocástico x_t que representa el comportamiento remanente no capturado por f_t . Hay acuerdo en cuanto a que los precios de la electricidad se comportan siguiendo un proceso de reversión en la media (véase a Pilipovic, 1998; Clewlow y Strickland, 2000; Lucia y Schwartz, 2002). Entonces x_t puede ser escrito como:

$$dx_t = \kappa(\Phi, t) x_{t-1} + d\Xi_t + \sigma \varepsilon_t$$

Donde $\kappa(\Phi, t)$ es la velocidad de reversión en la media; $d\Xi_t$ un proceso de salto que representa los picos en los precios; ε_t una variable aleatoria que sigue una distribución normal estándar de probabilidades, y σ , una constante. Cuando se considera que hay varios regímenes de comportamiento de los precios, ellos pueden ser representados definiendo una especificación para dx_t para cada uno de los regímenes existentes.

Weron, Kozłowska y Nowicka-Zagrajek (2001) modelan los precios promedios dia-

rios en el mercado de California por medio de un proceso continuo de reversión en la media, y concluyen que a pesar de ciertas ventajas, el proceso no es adecuado para capturar la dinámica de la serie. En adición, ellos sugieren que es necesario determinar si los modelos de series de tiempo para procesos discretos podrían ofrecer un mejor ajuste a los datos del mercado.

Lucia y Schwartz (2002) han empleado esta aproximación para modelar el logaritmo de los precios diarios del mercado noruego usando f_t para distinguir entre días de trabajo y fines de semana, y así representar el ciclo semanal. El componente estocástico es especificado como el proceso de reversión en la media definido anteriormente.

Huisman y Mahieu (2001) modifican la aproximación anterior considerando que la componente estocástica x_t se compone de dos procesos de reversión en la media: el primero para períodos normales y el segundo para períodos de picos en los precios. En este último trabajo se incorporan saltos estocásticos para considerar los picos instantáneos en los precios que son debidos a la insatisfacción de la demanda.

Weron, Bierbrauer y Truck (2004) han encontrado que las soluciones sugeridas en la literatura son usualmente no universales o insatisfactorias. Los autores proponen un proceso de difusión de salto y un proceso de cambio de régimen para modelar los precios diarios del mercado noruego de energía, donde la diferencia entre los modelos está en el mecanismo de formación del pico.

Mount et al. (2006) muestran que un modelo estocástico de cambio de régimen con

parámetros cambiantes en el tiempo puede pronosticar el comportamiento de la volatilidad del mercado de Pensylvania, New Jersey y Maryland (PJM), donde el régimen de precios altos corresponde a los picos en los precios observados que ocurren durante los meses de verano.

3.1.2 Procesos estocásticos discretos

La estructura temporal de los precios es modelada como:

$$p_t = f(\Psi_p, X_t) + g(\Theta_p, X_t)\varepsilon_t$$

Donde el precio p_t es una variable aleatoria con media $f(\Psi_p, X_t)$ y varianza $g(\Theta_p, X_t)$. X_t es la información disponible en el instante t , usualmente los precios previos p_{t-1}, \dots , así como los valores pasados de las variables explicativas. Ψ_p y Θ_p son los parámetros del modelo dependientes del tiempo.

Este modelo genérico es capaz de representar relaciones no lineales entre X_t y p_t , así como volatilidad variable y grupos de volatilidad, los cuales podrían ser explicados como una función de los factores determinantes de los precios. Especificando las funciones $f()$ y $g()$, muchos modelos pueden ser obtenidos, incluyendo modelos autorregresivos, redes neuronales, modelos de regresión de transición suave, entre otros. Bajo esta aproximación, muchas de las experiencias reportadas pueden clasificarse.

Crespo-Cuaresma, Hlouskova, Kossmeier y Obersteiner (2004) estudian las habilidades de varios modelos univariados para la predicción de precios de electricidad en mercados de corto plazo, usando datos horarios del mercado *Leipzig Power Exchange* (LPE). Los mode-

los seleccionados se obtienen siguiendo una estrategia de modelado hora-a-hora, donde cada hora del día es modelada separadamente en vez de la especificación del modelo para toda la serie.

Adicionalmente, la incorporación de procesos probabilísticos simples para simular los picos en los precios puede conducir a mejoras en la habilidad de predicción de los modelos univariados. Ellos sugieren que deben conducirse investigaciones posteriores involucrando una mayor sofisticación en los modelos estadísticos, al considerar la volatilidad cambiante en el tiempo y las no linealidades en el proceso que representa la media condicional de la serie.

Yamin, Shahidepour y Li (2004) proponen un modelo compuesto de módulos para la simulación, el pronóstico y el análisis del desempeño, para la predicción de precios horarios de electricidad. Ellos muestran que los límites en las líneas de transmisión, los patrones de carga, la salida de operación de las líneas y las plantas de generación impactan los precios de la electricidad; igualmente, ellos también proponen una nueva definición del *error absoluto porcentual medio* utilizando la mediana, que es menos sensitiva que el promedio a la presencia de valores extremos, como los picos, lo que permite superar algunas críticas a los métodos tradicionales para evaluar el desempeño de los pronósticos de precios de electricidad.

Hong y Lee (2005) presentan un método para vaticinar precios horarios en el mercado PJM usando una red neuronal recurrente, donde parte de las entradas son el resultado de un sistema de inferencia difuso, empleado para razonar sobre las contingencias descritas por medio de términos lingüísticos.

Lu et al. (2005) predicen los precios horarios normales usando un modelo basado en una red neuronal artificial y un sistema de descomposición; mientras que los picos en los precios, sus niveles y los intervalos de confianza a ellos son pronosticados por medio de un modelo basado en minería de datos.

Byström (2005) investiga los cambios en los precios horarios de electricidad en el mercado noruego usando un modelo AR-GARCH, combinado con la teoría de valor extremo para representar las colas de la distribución de los datos. Se encontró que las características típicas de los precios son una volatilidad muy alta, así como un gran número de cambios muy grande en los precios y las estacionalidades y una alta no normalidad de la distribución de probabilidades de los datos. Más aún, modelando explícitamente la estacionalidad asociada con el año para la componente de volatilidad del modelo, la precisión es incrementada.

Conejo et al. (2005) predicen los precios horarios un día adelante en el mercado PJM usando diferentes modelos. Ellos concluyen que los algoritmos de regresión dinámica y de función de transferencia son más eficientes que los modelos ARIMA, las redes neuronales y la descomposición espectral, y señalan que la investigación sobre la combinación de la descomposición espectral y los algoritmos de regresión dinámica y función de transferencia es promisoría.

Arciniegas y Marathe (2005) usan un algoritmo de aprendizaje basado en máquinas de vector de soporte para seleccionar las variables que explican los picos de los precios de electricidad en tiempo real para el *mercado independiente de potencia* en

Ontario y así encontraron que la mayoría de las dependencias son no lineales. En adición, una comparación de los resultados con el método tradicional muestra que las variables explicativas seleccionadas por el algoritmo de aprendizaje propuesto son acordes con la teoría, y permiten obtener mejores modelos de predicción.

Gareta, Romeo y Gil (2006) muestran que las redes neuronales artificiales son adecuadas para proyectar precios horarios de electricidad para el siguiente día, y dos o tres días después. Chan y Gray (2006) proponen un modelo que combina autorregresión y estacionalidad semanal en la especificación de la media condicional y la varianza condicional de los retornos, así como los efectos de apalancamiento usando un modelo EGARCH, con el fin de pronosticar los precios diarios de electricidad. En esta aproximación, la teoría de valor extremo es usada para modelar explícitamente las colas de la distribución de los retornos.

3.2 *Análisis fundamental*

El análisis fundamental está basado en la representación de las fuerzas de la oferta y la demanda, donde los precios son obtenidos considerando su equilibrio en el mercado y las particularidades de la electricidad. Así, esta aproximación permite capturar el efecto de largo plazo de los factores determinantes de los precios; sin embargo, los precios futuros obtenidos a través del análisis deben ser entendidos como tendencias en el comportamiento y no como verdaderos pronósticos.

Particularmente, Deb et al. (2000) argumentan que los modelos tradicionales basados en

costos de producción y que muchas técnicas para el análisis de series temporales no representan adecuadamente el comportamiento de los precios en los mercados de electricidad, ya que pasan por alto la influencia de muchos factores determinantes, así como las restricciones en la transmisión, y desprecian la volatilidad. Así, se propone un modelo de flujo óptimo de potencia multiárea que ejecuta simulación de Monte Carlo para tener en cuenta los principales determinantes.

Yu y Sheblé (2006) proponen modelar los mercados de electricidad como sistemas dinámicos que evolucionan en el tiempo siguiendo un proceso de Markov, conducido por las fuerzas económicas subyacentes. El modelo se concentra en capturar la interacción entre las fuerzas que conforman la oferta y la demanda –estructura del mercado, arquitectura y estrategias de competición de los agentes–, vinculando los determinantes fundamentales al comportamiento de los precios y permitiendo la construcción de tendencias de precios para el medio y el largo plazo.

Las principales limitaciones de esta aproximación están relacionadas con la necesidad de pronosticar el comportamiento de los determinantes de los precios, lo cual introduce nuevas fuentes de incertidumbre, y con la dificultad de incorporar conocimiento cualitativo o subjetivo sobre la evolución del mercado.

3.3 Aproximaciones híbridas

Vehviläinen y Pyykkönen (2005) presentan una aproximación híbrida para el modelado de mediano plazo de los precios de la electricidad, donde los factores fundamentales son representados independientemente como

procesos estocásticos, y los precios son obtenidos por medio de un modelo de equilibrio del mercado. El modelo es aplicado al mercado escandinavo de electricidad, con el ánimo de valorar un derivado exótico.

4. Barreras que dificultan la predicción de precios de la electricidad

4.1 Complejidad del mercado y limitaciones del ser humano para el procesamiento de información

La complejidad de los mercados eléctricos es debida al alto número de factores físicos, a las acciones de los participantes y del administrador de mercado y a la interacción y relaciones de causalidad entre ellos. Muchos factores físicos están relacionados con las condiciones climáticas, y tienen un comportamiento impredecible en el mediano y en el largo plazo. Otros factores están asociados con los cambios tecnológicos y sociales, como innovaciones en la generación de la electricidad o los cambios en los patrones de consumo, los cuales no son previsibles en el mediano o largo plazo.

En relación con las decisiones de negocio, la adaptación y la reformulación de estrategias empresariales individuales, en respuesta a los cambios en el mercado, causan un efecto de realimentación entre los participantes, tal que los efectos son no lineales, no proporcionales, imprevisibles e irreversibles. En contraste, las limitadas capacidades mentales para entender el comportamiento del mercado y para evaluar el desempeño de las predicciones pasadas son importantes barreras para obtener pronósticos que posean un buen comportamiento (véanse

los trabajos de Hogarth, 1994; Goodwin y Wright, 1991).

Los modelos mentales se fundamentan en entender el comportamiento del mercado, y son la base primaria para realizar o juzgar predicciones de los precios de electricidad. Sin embargo, estos modelos mentales son simplificados, agregados y parciales, y representan una pintura incompleta del mercado, puesto que el aprendizaje es realizado a partir de las limitaciones en la información disponible, el número y la complejidad de los factores que afectan el precio y las experiencias pasadas.

Los juicios están expuestos a ilusiones de validez, falsas atribuciones de causalidad, causalidades espurias y confianza excesiva en las predicciones. Más aún, los juicios emitidos por los expertos parecen altamente intuitivos, más que obtenidos por medio de un proceso formal, ordenado y sistemático, tal que existen importantes desviaciones y errores sistemáticos.

Así, el entendimiento del mercado y el conocimiento experto son la fuente primaria de la información necesaria para el modelado de los precios históricos y para la predicción de los precios futuros. Para el modelado, la dinámica de los precios podría representarse por medio de modelos matemáticos que consideren el conocimiento subjetivo y los datos históricos, y así las características particulares de las series de precios, como los cambios estructurales, los cambios de volatilidad o las tendencias locales podrían ser analizadas y explicadas.

Para la predicción, el conocimiento privilegiado sobre eventos futuros que podrían

afectar el comportamiento de los precios es una importante fuente de información, a fin de intervenir los pronósticos y mejorar su precisión. Sin embargo, la intervención del pronóstico es una tarea difícil, ya que los ajustes a la predicción deben ser cuantificados a partir de apreciaciones e hipótesis sobre eventos futuros, situaciones similares en el pasado, el comportamiento esperado de los factores determinantes de los precios y su influencia relativa.

Los avances metodológicos y el desarrollo de mejores herramientas que promuevan la validación del conocimiento experto y faciliten el análisis de la información histórica con el fin de cuantificar los efectos de los eventos futuros sobre los precios son bien pagas en términos de precisión, transparencia, reproducibilidad y aprendizaje, así como en entendimiento del mercado. Entonces, existe la necesidad de contar con herramientas que permitan al pronosticador analizar la información histórica para validar hipótesis sobre las condiciones del mercado y para construir pronósticos usándolas. En adición, es necesario validar si los ajustes basados en la experiencia son de valor para mejorar la precisión de los pronósticos. Así, estas herramientas son valiosas, en cuanto promueven el aprendizaje y la calidad del proceso de predicción.

4.2 Políticas organizacionales

Es clara la importancia de la predicción en la toma de decisiones empresariales (Makridakis, Wheelwright y McGee, 1983), de tal forma que existe actualmente una presión en aumento para obtener pronósticos precisos en respuesta a la competitividad del mercado (Sanders, 2005). Así, la capacidad de

predicción es más una tarea crítica que una ventaja competitiva (Armstrong, 2001; Fildes y Hastings, 1994). De esta forma, las políticas empresariales (quién, cuándo y cómo) desempeñan un papel crucial en la precisión, calidad, coherencia y oportunidad de los pronósticos de los precios de la electricidad, ya que impactan otros aspectos diferentes de la parte técnica del proceso de predicción. Por ende, dichas políticas también afectan el desempeño de la empresa en el mercado.

4.3 Falencias del proceso de pronóstico

Los pronósticos basados en juicios son más creíbles que aquellos basados en sofisticados modelos matemáticos (Bunn y Wright, 1991); sin embargo, la calidad del pronóstico se ve afectada por el hecho de que no se basan en un proceso sistemático de razonamiento, tal que ellos no son fácilmente defendibles, argumentables y sustentables en las evidencias, y resulta difícil documentar cómo fueron obtenidas las predicciones. Por esta razón, no es posible realizar procesos de realimentación y revisión con el ánimo de mejorar las prácticas y corregir las desviaciones y errores sistemáticos.

Las limitaciones humanas para el procesamiento de la información impactan directamente en la calidad de la representación mental del mercado de forma que los pronósticos basados en juicios son de poco valor; esto es, debido a las dificultades para reconocer muchas relaciones causales simultáneamente, en especial cuando ellas son no lineales. En adición, el efecto futuro de los determinantes de los precios podría ser sobrevaluado o subvalorado o, en el peor caso, las predicciones tendrían en cuenta los

efectos de variables de poca importancia o sin influencia en la evolución de los precios. Más aún, el comportamiento de muchos de los factores es complejo, de forma que es difícil su pronóstico. Finalmente, las descripciones subjetivas sobre cómo los expertos elaboran sus pronósticos son imperfectas e incompletas (Harries y Harvey, 2000) y dificultan la documentación del proceso, con el fin de realizar evaluaciones *ex post* de los pronósticos.

Por las razones expuestas, las técnicas de modelado matemático parecen ser más adecuadas para predecir los precios de la electricidad, al menos, por su capacidad para manejar un número importante de variables explicativas y por proveer métodos objetivos basados en evidencias estadísticas.

El modelado matemático puede separarse en dos aproximaciones principales: la primera tiene por objetivo proveer al pronosticador las herramientas para racionalizar y depurar los procesos de emisión de juicios; mientras la segunda promueve la eliminación de la participación del experto y trata de construir modelos de pronóstico partiendo del conocimiento oculto en los datos. La segunda aproximación está relacionada con los modelos estadísticos, las técnicas econométricas y las técnicas de inteligencia computacional, donde los juicios son reemplazados por inferencia estadística y otras técnicas de modelado numérico. Sin embargo, esta última aproximación trata de eliminar los juicios en relación con el mercado y con la evolución de los precios, incorporando nuevas fuentes de experiencia asociadas con el conocimiento del modelo y de sus propiedades, el cual es necesario durante su proceso de construcción.

Las desviaciones y los errores sistemáticos degradan ostensiblemente la precisión y la calidad de los pronósticos basados en juicios. En este mismo sentido, las técnicas de modelado matemático ofrecen a los pronosticadores modelos sofisticados capaces de manejar cantidades considerables de información; pero en esta aproximación es difícil incorporar el conocimiento subjetivo, usualmente disponible a los pronosticadores.

Así, las características complementarias de ambas aproximaciones podrían aumentar la calidad y la precisión de los pronósticos (Blattberg y Hoch, 1990). Harvey (2005) ha encontrado indicios de que el uso de pronósticos matemáticos como entradas para la predicción basada en juicios reduce la calidad de los resultados finales. Goodwin (2005) anota que el promedio aritmético es una forma simple de obtener buenos pronósticos. En un contexto organizacional, Sanders y Manrodt (1994) sugieren que el ajuste de los pronósticos matemáticos usando juicio experto es la práctica más común.

En concordancia con Sanders y Manrodt (1994), y debido a las características de los mercados de electricidad y a las necesidades de información para la toma de decisiones, el uso de herramientas para el modelado matemático como fuente primaria de los pronósticos, combinada con el ajuste basado en juicios para incorporar el conocimiento subjetivo parece ser la práctica más adecuada.

4.4 Experiencias limitadas

La mayoría de las experiencias reportadas se relacionan con la predicción de precios horarios o diarios; sin embargo, existe la

necesidad del modelado y la predicción de mediano y largo plazo en escalas de semanas, meses e incluso años. El modelado es necesario para entender cómo fue la dinámica de los precios, cuál es la influencia de los factores determinantes en estas escalas y para evaluar si las decisiones pasadas fueron correctas. La predicción es necesaria para la toma de decisiones estratégicas, tal que los participantes tengan una visión de largo plazo del mercado. Esta capacidad permite a los administradores y gerentes entender cómo los factores determinantes podrían cambiar y cómo podría ser su impacto en el comportamiento de los precios. No obstante, hay pocas experiencias relacionadas con la predicción en el mediano y largo plazo.

Muchas de las propiedades de los precios diarios de la electricidad tienen una fuerte influencia en las agregaciones de los datos, como precios promedios mensuales o semanales; sin embargo, el examen de las series de precios en escalas de semanas, meses o años estaría en la capacidad de revelar importantes propiedades relacionadas con la influencia de largo plazo de algunos factores, así como el efecto de otros factores ocultos (como las innovaciones tecnológicas), los cuales deben ser considerados en el pronóstico de largo plazo.

Estas propiedades son valiosas para caracterizar qué clase de modelos podrían ser más adecuados para predecir precios de electricidad. Como una ilustración, Knittel y Roberts (2005) concluyen que los modelos financieros actuales son de poco valor para modelar precios de electricidad y que la presencia de grandes diferencias en los momentos relativos a una distribución gaussiana hace que los modelos basados en la normalidad

sean de uso limitado en la representación de la dinámica de los precios de electricidad.

Es necesario identificar cuáles son las características más importantes que deben ser representadas por el modelo, para capturar con precisión el comportamiento de largo plazo de la serie de precios. Knittel y Roberts (2005) enfatizan los agrupamientos de volatilidad y las altas correlaciones como dos de las más importantes características de los precios; no obstante, estas conclusiones son únicamente válidas para series con características similares a los precios horarios del mercado de California. Así, la suposición sobre la presencia o ausencia de tendencia o variaciones estacionales en el largo plazo podría conducir a seleccionar diferentes clases de modelos.

4.5 Los modelos, sus supuestos y sus hipótesis

Sin duda, el uso de modelos de series temporales no lineales en macroeconomía y teoría financiera está motivado por la creencia de que los modelos lineales son inadecuados para capturar ciertos tipos de comportamiento. Igual ha pasado en la predicción de precios de la electricidad; sin embargo, los modelos que se han utilizado en los casos reportados en la literatura más relevante no agotan la lista de modelos posibles. No obstante, el problema no es simplemente estimar cada modelo para la serie de precios de electricidad estudiada. Mientras en el caso lineal hay una importante experiencia ganada, existen muchos problemas teóricos, metodológicos y empíricos abiertos sobre el uso de modelos no lineales en el caso general, los cuales se extrapolan directamente al caso del pronóstico de los precios (véase Clements, Frances y Swanson, 2004). Estos problemas

generales están relacionados con los aspectos que se listan a continuación, y para los cuales muchas de las recomendaciones dadas en la literatura son contradictorias:

- No existen razones empíricas, metodológicas o teóricas para preferir un modelo específico entre varias alternativas.
- Hay poco entendimiento de las propiedades estadísticas de muchos de los modelos listados.
- Falta claridad sobre cuáles son los procedimientos más adecuados para la estimación, la validación y la prueba de cada modelo particular.
- No hay concordancia en cómo seleccionar el modelo final cuando se consideran varios alternativos. Una aproximación para manejar este problema consiste en comparar los momentos estadísticos de los modelos estimados y de los datos, pero la dinámica de largo plazo de los precios podría implicar que la serie temporal no es ergódica y, consecuentemente, los momentos no son constantes sobre el tiempo. Igualmente, existen muchas críticas en el uso de criterios basados en alguna medida de error.
- Es confuso cuándo y cómo transformar los datos antes de realizar el modelado.
- No hay claridad en cómo combinar pronósticos provenientes de varios modelos alternativos y en si existen ganancias derivadas de esta práctica.
- Es difícil incorporar información cualitativa, subjetiva y contextual en los pronósticos.
- Existen muchas críticas respecto a cómo establecer el desempeño de los modelos no lineales. Como es argumentado por

Tong (1995), entre otros, el desempeño superior de los modelos no lineales se debe a las características particulares de las series temporales en el momento de realizar las predicciones. Es necesario clarificar en qué aspectos el modelo no lineal es superior en relación con un modelo lineal.

- En el caso particular de los sistemas difusos de inferencia y las redes neuronales artificiales, predecir series temporales es considerado, salvo unos cuantos casos particulares, como una parte integrante del problema general de regresión y desconocimiento de las complejidades, como la estructura temporal y dinámica del modelo.

Las características particulares de las series de precios de la electricidad, relacionadas con sus propiedades estadísticas (estructura de largo plazo cambiante, ciclos estacionales, etc.) y la complejidad y el gran número de factores que los afectan, imponen ciertos requerimientos que se suman a la problemática ya mencionada, para que un modelo pueda ser adecuado para construir pronósticos:

- La representación de relaciones no lineales.
- La capacidad para manejar simultáneamente una gran cantidad de variables explicativas.
- La capacidad de ponderar la información disponible en el tiempo.

4.6 Horizonte de predicción

El proceso de especificación y de estimación de los modelos listados se basa en la

información histórica disponible, por lo que los pronósticos son la extrapolación de las relaciones históricas entre los precios y sus determinantes. Este es un peligro que ya lo señaló Harvey: “... *it is always very difficult to predict the future on the basis of the past. Indeed it has been likened to driving a car blindfolded while following directions given by a person looking out of the back window ...*” (1989, p. xi), lo cual imposibilita que se pueda anticipar un cambio en la dinámica de los precios que sea causado por alguna variación en las condiciones del mercado. Así, la incertidumbre en la predicción está relacionada con:

- La incertidumbre de los valores futuros de las variables explicativas de los precios que fueron consideradas en el modelo.
- La consistencia entre los valores futuros que tomarán los factores determinantes de los precios.
- Los hechos futuros que puedan afectar de una manera importante las condiciones del mercado.
- La incertidumbre de los valores futuros de las variables explicativas que no fueron consideradas en el modelado.

Estas falencias hacen que los pronósticos sean menos creíbles, argumentables, defendibles y coherentes con la realidad. De esta forma, es necesario que se incorporen la información que se posea sobre eventos futuros que afecten los precios (Harvey, 1989; Pole, West y Harrison, 1994); pero su consideración implica predecir los valores futuros de los factores explicativos y su efecto en los precios, así como la construcción de conjeturas creíbles y veraces sobre hechos atípicos

que afectarán al mercado. Quedan expuestas así dos limitantes fundamentales:

- El corto horizonte en que las predicciones son válidas.
- La dificultad para construir pronósticos de mediano y largo plazo, debido al gran número de factores y los riesgos existentes en el mercado.

Al considerar las críticas anteriores, no es sorpresivo que muchos estudios reportados en la literatura estén restringidos a la predicción de precios horarios o diarios, donde es posible asumir algunas de las hipótesis en que se basan los modelos.

Conclusiones

La predicción de los precios de electricidad es un insumo primordial para que los agentes del mercado tomen decisiones. En este artículo se han discutido las principales barreras encontradas por los modeladores y los pronosticadores cuando se realiza dicha tarea. Las barreras, que dificultan la preparación de los pronósticos de los precios, están relacionadas con la complejidad del mercado, las limitaciones de la mente humana para el procesamiento de la información, las políticas organizacionales, los problemas metodológicos y el número limitado de experiencias reportadas.

Como un resultado del análisis realizado, se encontró que existen muchos requerimientos para obtener buenos pronósticos; sin embargo, otras preguntas emergentes, relacionadas con el problema de predicción de precios de electricidad, saltan a la vista:

- ¿Cuáles son las propiedades de los precios medios mensuales o semanales?

- ¿Hay ganancias al incorporar las predicciones de los factores cuando se usan modelos causales?
- ¿Cuál es la importancia de los factores en relación con sus efectos en los precios?
- ¿Es la importancia de los factores igual durante todo el tiempo?
- ¿Es posible obtener pronósticos para los factores más importantes, al menos en el mediano plazo?
- ¿Cuáles son los modelos más adecuados?
- ¿Cuáles características de los precios deberían ser explícitamente representadas?
- ¿Cómo deberían ser incorporados los efectos de la edad de los datos en los modelos?
- ¿Cómo debería seleccionarse el modelo final entre varias alternativas?
- ¿Cómo podrían modelarse de forma simultánea las no linealidades en la media y la varianza?
- ¿Cómo podrían usarse dichos modelos para la toma de decisiones?
- ¿Cuándo es necesario reformular un modelo?

Estas preguntas deberán responderse en investigaciones futuras.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a tres evaluadores anónimos, cuyos comentarios permitieron mejorar ampliamente la calidad del artículo.

Lista de referencias

- Anders, U. y Korn, O. (1999). Model selection in neural networks. *Neural Networks* 12, 309-323.
- Angelus, A. (2001). Electricity price forecasting in deregulated markets. *The Electricity Journal*, 14 (3), 32-41.
- Arciniegas, I. and Marathe, A. (2005). Important variables in explaining real-time peak price in the independent power market of Ontario. *Utilities Policy*, 13, 27-39.
- Armstrong, J. (2001). *Principles of forecasting*. New York: Kluwer Academic Press.
- Beggs, C. (2002). *Energy management, supply and conservation*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Blattberg, R. and Hoch, S. (1990). Database models and managerial intuition: 50 model + 50 manager. *Management Science* (36), 887-889.
- Box, G. E. P. and Jenkins, G. M. (1976). *Time series analysis: forecasting and control*. San Francisco: Holden-Day.
- Bunn, D. and Wright, G. (1991). Interaction of judgemental and statistical forecasting methods: issues and analysis. *Management Science*, 37 (5), 501-518.
- Byström, H. (2005). Extreme value theory and extremely large electricity prices changes. *International Review of Economics and Finance*, 14, 41-55.
- Chan, K. and Gray, P. (2006). Using extreme value theory to measure value-at-risk for daily electricity spot prices. *International Journal of Forecasting*, 22, 283-300.
- Clements, M., Frances, P. and Swanson, N. (2004). Forecasting economic and financial time-series with non-linear models. *International Journal of Forecasting*, 20, 169-183.
- Clewlow, L. and Strickland, C. (2000). *Energy derivatives: pricing and risk management*. London: Lacima.
- Conejo, A., Contreras, J., Espinosa, R. and Plazas, M. (2005). Forecasting electricity prices for a day-ahead pool-based electric energy market. *International Journal of Forecasting* (21), 435-462.
- Crespo-Cuaresma, J., Hlouskova, J., Kossmeier, S. and Obersteiner, M. (2004). Forecasting electricity spot-prices using linear univariate time-series models. *Applied Energy*, 77, 87-106.
- Davison, M., Anderson, C., Marcus, B. and Anderson, K. (2002). Development of a hybrid model for electrical power spot prices. *IEEE Transaction on Power Systems*, 17 (2), 257-264.
- Deb, R., Albert, R., Hsue, L. and Brown, N. (2000). How to incorporate volatility and risk in electricity price forecasting. *The Electricity Journal*, 13 (4), 65-75.
- Del Sol, P. (2002). Responses to electricity liberalization: the regional strategy of a Chilean generator. *Energy Policy*, 30 (5), 437-446.
- Deng, S. (2000a). *Pricing electricity derivatives under alternative stochastic spot price models*. Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences.
- (2000b). Stochastic models of energy commodity prices and their applications: mean-reversion with jumps and spikes. Technical report

- power working paper-073. Georgia Institute of Technology.
- Doffner, G. (1996). Neural network for time series processing. *Neural Networks World* (4), 447-468.
- Dyner, I. (1998). El mercado eléctrico colombiano: resultados, problemas y perspectivas. *Energética* (20), 75-86.
- Ethier, R. (1999). *Valuing electricity assets in deregulated markets: a real options model with mean reverting and jumps*. Technical report. Cornell: Cornell University.
- and Mount, T. (1998). *Estimating the volatility of spot prices in restructured electricity markets and the implications for options values*. Technical report. Cornell: Cornell University.
- Fildes, R. and Hastings, R. (1994). The organization and improvement of market forecasts. *Journal of the Operational Research Society*, 45 (1), 1-6.
- Gareta, R., Romeo, L. and Gil, A. (2006). Forecasting of electricity prices with neural networks. *Energy Conversion and Management*, 47, 1770-1778.
- Goodwin, P. (2005). How to integrate management judgement with statistical forecasts. *Foresight*, 1 (1), 8-11.
- Goodwin, P. and Wright, G. (1991). *Decision analysis for management judgment*. New York: John Wiley and Sons.
- (1994). Heuristics, biases and improvement strategies in judgemental time series forecasting. *Omega, International Journal of Management Science*, 22 (6), 553-568.
- Hansen, J. and Nelson, R. (1997). Neural network and time series methods: a synergic combination in state economic forecasts. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 8 (4), 863-873.
- Harries, C. and Harvey, N. (2000). Taking advice, using information and knowing what are you doing. *Acta Psychologica* (104), 399-416.
- Harvey, A. (1989). *Forecasting, structural time series models and the Kalman filter*. Cambridge: Cambridge University Press.
- (2005). Relative merits of different ways of combining judgement with statistical forecasts. *Foresight*, 1(1), 18-22.
- Hogarth, R. (1994). *Judgement and choice* (2nd ed.). New York: John Wiley and Sons.
- Hong, Y. and Hsiao, C. (2001). Locational marginal price forecasting in deregulated electricity markets using a recurrent neural network. *Power Engineering Society Winter Meeting*, 2, 539-533.
- (2002). Locational marginal price forecasting in deregulated electricity markets using artificial intelligence. *IEEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution*, 149, 621-626.
- Hong, Y. and Lee, C. (2005). A neuro-fuzzy price forecasting approach in deregulated electricity markets. *Electric Power Systems Research*, 73, 151-157.
- Huisman, R. and Mahieu, R. (2001). *Regime jumps in electricity prices*. Technical report.

- Rotterdam: Erasmus Research Institute of Management.
- Jaccard, M. (1995). Oscillating currents, the changing rationale for government intervention in the electricity industry. *Energy Policy*, 23(7), 579-592.
- Kaastra, I. and Boyd, M. (1996). Designing a neural network for forecasting financial and economic series, *Neurocomputing* (10), 215-236.
- Knittel, C. and Roberts, M. (2001). *An empirical examination of deregulated electricity prices*. Technical report. Program on Workable Energy Regulation (POWER). Berkeley: University of California, Energy Institute.
- (2005). An empirical examination of restructured electricity prices. *Energy Economics*, 25, 791-817.
- Lu, X., Dong, Z. and Li, X. (2005). Electricity market price spike forecast with data mining techniques. *Electric Power Systems Research*, 73 (1), 19-29.
- Lucia, J. and Schwartz, E. (2002). Electricity prices and power derivatives: Evidence from the Nordic power exchange. *Review of Derivatives Research*, 5(1), 5-50.
- Makridakis, S., Wheelwright, S. and McGee, V. (1983). *Forecasting: methods and applications*. New York: John Wiley and Sons.
- Medeiros, L. (2003). *Previsão do preço spot no mercado de energia elétrica*. Tesis de doctorado no publicada, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil.
- Midttun, A. (1997). The Norwegian, Swedish and Finnish reforms: competitive public capitalism and the emergence of the Nordic Internal Market. In *European electricity systems in transition* (pp. 89-130). New York: Elsevier.
- Mount, T., Ning, Y. y Cai, X. (2006). Predicting price spikes in electricity markets using a regime-switching model with time-varying parameters. *Energy Economics*, 28, 62-80.
- O'Connor, M., Remus, W. and Griggs, K. (1993). Judgemental forecasting in times of change. *International Journal of Forecasting*, 9, 163-172.
- Organización Latinoamericana de Energía (Olaed), (1991). *Situación energética de América Latina y el Caribe: transición hacia el siglo XXI*. Quito: autor.
- Parkinson, T. (2004). Market price risks of merchant generation. *The Electricity Journal*, 17 (4), 33-48.
- Pilipovic, D. (1998). *Energy risk: valuing and managing energy derivatives*. New York: McGraw Hill.
- Pole, A., West, M. and Harrison, J. (1994). *Applied Bayesian forecasting and time series analysis*. Boca Ratón: Chapman & Hall.
- Pulgarín, A., Smith, R. y Poveda, G. (2001). *Predicción del precio de la energía eléctrica con un modelo de redes neuronales y usando variables macroclimáticas*. Documento procedente del XIV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología.
- Ramsay, B. and Wang, A. (1998). A neural network based estimator for electricity spot-pricing with particular reference to weekend and public holidays. *Neurocomputing* (23), 47-57.

- Sanclemente, C. (1993). *Desarrollo y crisis del sector eléctrico colombiano 1890-1993*. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- Sanders, N. (2005). When and how should statistical forecasts be judgementally adjusted? *Foresight*, 1 (1), 5-7.
- and Manrodt, K. (1994). A survey of current forecasting practices in us corporations. *Interfaces*, 24 (2), 92-100.
- Schwartz, P. (1996). *The art of the long view: Paths to strategic insight for yourself and your company*. New York: Doubleday.
- Silva, B., Teixeira, J. y Gomes, L. (2001). *Previsão de preços spot e avaliação de projetos de geração termelétrica*. Documento procedente del IX Semiário de Planejamento Econômico-Financeiro do Setor Elétrico (SEPEF).
- Souza, R. (2002, July 8-12). *Modelling the brazilian spot price series*. Documento procedente de International Federation of Operational Research Society (IFORS) 16-th Triennial Conference.
- Steiner, F. (2000). Regulation, industry structure and performance in the electricity supply industry. *OECD Economic Studies* (32).
- Sterman, J. (2000). *Business dynamics*. New York: Irwin-McGraw Hill.
- Stoft, S. (2002). *Power system economics*. New York: Wiley-Interscience.
- Szkuta, B., Sanabria, L. and Dillon, T. (1998). Electricity price short-term forecasting using artificial neural networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 14 (3), 851-867.
- Tong, H. (1995). A personal overview of non-linear time series analysis from a chaos perspective. *Scandinavian Journal of Statistics*, 22, 399-445.
- Van der Heijden, K., Bradfield, R., Burt, G. C. and Wright, G. (2002). *The sixth sense: Accelerating organisational learning with scenarios*. New York: John Wiley & Sons.
- Vehviläinen, I. and Pyykkönen, T. (2005). How to incorporate volatility and risk in electricity price forecasting. *Energy Economics*, 27, 351-367.
- Ventosa, M., Baillo, A., Ramos, A. and Rivier, M. (2005). Electricity market modeling trends. *Energy Policy*, 33, 897-913.
- Velásquez, J. D. and Dyner, I. (2001). Pronóstico de precios de bolsa de electricidad usando un modelo de redes neuronales artificiales. En *EITI-2001*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Weron, R., Bierbrauer, M. and Truck, S. (2004). Modeling electricity prices: jump diffusion and regime switching. *Physica A* 336, 39-48.
- Weron, R., Kozłowska, B. and Nowicka-Zagrajek, J. (2001). Modeling electricity loads in California: a continuous-time approach. *Physica, A* 299, 344-350.
- Yamin, H., Shahidehpour, S. and Li, Z. (2004). Adaptive short-term electricity price forecasting using artificial neural networks in the restructured power markets. *Electrical Power and Energy Systems*, 26, 571-581.
- Yu, W. and Sheblé, G. (2006). Modeling electricity markets with hidden Markov model. *Electric Power Systems Research*, 76, 445-451.