

Limitaciones de los modelos de simulación de mercados de energía eléctrica

Julián Barquín

Resumen

Las herramientas de simulación de mercados de energía eléctrica han visto un apreciable desarrollo. Actualmente, son capaces de simular el comportamiento de mercados con una representación realista y detallada de los activos de generación y de las estrategias de los distintos agentes. No obstante, existen todavía serias limitaciones en lo tocante a la representación de diversos aspectos de estos mercados. Este artículo expone las limitaciones de las herramientas actualmente existentes, teniendo en cuenta especialmente las circunstancias del caso español.

Códigos JEL: C63, L94, L13

1 Introducción

El uso de modelos de simulación de mercados de energía eléctrica ha recibido una creciente atención durante los últimos años, debido tanto a la extensión de este tipo de organización económica de la industria (en substitución de los sistemas regulados tradicionales) como a recientes avances tanto en los aspectos teóricos del problema como en las capacidades computacionales a disposición de los analistas¹.

Existen dos tipos de usos principales de estos modelos:

1. Usos de tipo **regulativo**, que pretenden abordar el impacto de diversas regulaciones en el comportamiento del mercado. Tienen la ventaja de que lo que a menudo se requieren son enunciados de tipo cualitativo, tales como si la regulación A es significativamente mejor que la B; o si una operación de fusión o adquisición debe ser autorizada por las autoridades correspondientes. Tienen el inconveniente de que, habitualmente, las situaciones de estudio difieren muy significativamente de la situación realmente existente, por lo que el comportamiento observado del mercado aporta una información limitada y de valor discutible en la nueva situación. Adicionalmente hay a menudo un problema de comunicación, tanto con profesionales sin formación técnica y económica específica como con

¹Una revisión actual es [1]

el público en general². Téngase en cuenta que estos modelos son extremadamente complejos, requiriendo en general su comprensión profunda una formación específica y larga (incluyendo conocimientos matemáticos, económicos y técnicos avanzados).

2. Usos de tipo **empresarial**, que realizan o encargan empresas concretas a fin de orientar su actividad en el mercado. En estos casos, es posible recurrir a ciertas técnicas de tipo econométrico, o formular ciertas hipótesis de comportamiento de los agentes que, aunque permiten la solución de los problemas planteados, pueden resultar de difícil defensa en casos de litigación o defensa de los propios intereses ante las autoridades. Típicamente, los problemas de comunicación son menores (se discute con personal muy cualificado), pero se demandan previsiones muy específicas a dichos modelos.

Dicho esto, se está todavía lejos de que estos modelos puedan proporcionar predicciones fiables de la operación de los mercados, aunque si permiten, en ocasiones y con las cautelas requeridas, inferir tendencias cualitativas y, en ocasiones, incluso algunos resultados cuantitativos o, más frecuentemente, semicuantitativos.

En este documento se exploran las limitaciones de estos modelos de simulación. Los destinatarios debieran ser conscientes de estas limitaciones cuando valoren los resultados proporcionados. Primeramente se describirán las metodologías propuestas más frecuentemente en la literatura especializada, y posteriormente se analizarán algunas de las limitaciones más frecuentes de estos modelos. Finalmente, estableceré mis conclusiones.

2 Taxonomía

La taxonomía de estos modelos de simulación es compleja, en la medida en que prácticamente toda técnica de simulación existente ha sido propuesta en algún momento para esta tarea. Probablemente esto ha sido debido, al menos parcialmente, al elevado nivel de detalle disponible en la descripción técnica de los sistemas de energía eléctrica y a la novedad e importancia de los recientes desarrollos económicos y regulativos.

No intentaré, por tanto, una descripción exhaustiva de cada técnica posible, si no más bien una descripción sucinta de los tipos de modelos más frecuentes empleados, especialmente en el contexto del mercado peninsular español. Tam-

²Un caso reciente es la reciente sentencia (31 de mayo de 2005) de un tribunal de Rotterdam anulando una decisión de la autoridad regulativa holandesa relativa a la fusión de Nuon y Reliant, dos compañías eléctricas. En este caso, el tribunal parece haber hecho uso de precedentes en sectores distintos de la electricidad, donde un examen de cuotas de mercado e indicadores relacionados pueden proporcionar información adecuada en estos sectores con productos menos peculiares que la electricidad [2]. Al mismo tiempo, el ministerio de economía holandés respalda los resultados del mismo modelo para cuantificar el efecto del comercio de permisos de emisión de CO2 en el precio de la electricidad.

bién es preciso señalar que la clasificación propuesta es indicativa, y que hay modelos reales que están “a caballo” entre dos o más categorías.

Una primera clasificación atiende al alcance temporal del modelo. Existen así modelos orientados a la elaboración de las ofertas concretas en los diversos mercados, cuyo horizonte natural es el diario, aunque en ocasiones puede extenderse al semanal en razón del ciclo semanal de operación de las plantas térmicas. La gestión de los embalses, el mantenimiento de los equipos, las compras de combustibles y otras tareas se analizan mediante modelos cuyo alcance es del orden de un año. Finalmente, existen actividades, tales como la valoración de inversiones, que requieren modelos de alcance superior.

Normalmente, los modelos de interés regulativo tienen un alcance al menos anual. Esto es debido a que habitualmente las autoridades no están interesadas en fluctuaciones fugaces del mercado, si no en el nivel medio de precios y naturaleza de la operación durante un período extendido.

Un segundo eje de clasificación se refiere al tipo de técnica de simulación. Los modelos se pueden dividir en dos grupos básicos: aquellos que pretenden calcular el “equilibrio del mercado”, y aquellos que no. Dada la importancia de este concepto, me detendré en el mismo.

Un equilibrio es un conjunto de precios y cantidades producidas y vendidas tales que ningún agente tiene incentivos económicos a modificar sus acciones. En este sentido, se puede justificar el considerarlo también como una predicción del comportamiento real de los agentes. Sin embargo, no es difícil encontrar casos teóricos donde dicho equilibrio no existe [3] o es múltiple [4]. En estos casos, la predicción es particularmente problemática, aunque las técnicas de simulación desarrollada pueden, no obstante, proporcionar en algunos casos información útil.

Existen algunos casos en los que es posible demostrar la existencia y unicidad del equilibrio, que proporciona así una predicción unívoca. Uno de dichos casos es el de un mercado de competencia perfecta, en el cual el equilibrio coincide con el punto de maximización del beneficio social neto³. Dicho caso proporciona también habitualmente la referencia con respecto a la cual han de compararse otros supuestos de operación del mercado.

En los mercados de energía eléctrica, la principal razón para desviarse de la operación de mercado perfecto, es la existencia de poder de mercado por parte de uno o más agentes [5, 6]. En efecto, normalmente las empresas de generación de electricidad suelen ser muy grandes, es decir, hay muy pocas; lo que incentiva el juego estratégico de las mismas, al verse capaces de influir en el precio del mercado⁴. Adicionalmente, existen también imperfecciones debidas a la existencia de asimetría de información y de mercados de futuros incompletos. La mayor parte de los modelos de simulación ignoran estas deficiencias.

³Obviando ciertos temas, de importancia menor en el caso de sistemas eléctricos grandes, relacionados con la falta de convexidad de los costes de producción.

⁴También son grandes las empresas de distribución y transporte, aunque la naturaleza regulada de estas actividades haga que esta sea una preocupación de menor entidad. No obstante, si están integradas con empresas de generación, puede ser requerida su consideración al determinar el equilibrio en el mercado de generación.

Un modelo de cálculo de equilibrio de mercado define un concepto de equilibrio, es decir, especifica matemáticamente un conjunto de variables técnicas y económicas relevantes, y establece un sistema de ecuaciones que formaliza matemáticamente la condición de ausencia de incentivos para cada agente. Este conjunto de ecuaciones se resuelve mediante algún procedimiento, típicamente numérico (aunque en ocasiones se han derivado soluciones analíticas para modelos muy simplificados).

Por contra, los modelos no basados en el cálculo de equilibrio no intentan abordar directamente el cálculo de este punto teórico, aunque en ocasiones el resultado de las simulaciones puede llegar a proporcionarlo. Aunque de nuevo existen varias posibilidades, las dos variedades más habituales son la “simulación por agentes” y la “dinámica de negocios”.

La **simulación por agentes** [7] pretende realizar una “maqueta virtual” del mercado de electricidad donde cada agente, representado por un programa informático (un “agente” en el sentido informático) toma decisiones, interactúa con el resto de los agentes en el seno del ordenador, y modifica sus acciones en rondas subsiguientes intentando maximizar su beneficio. En principio, permite modelar estructuras de mercado extremadamente complejas. Sin embargo, es difícil garantizar que las estrategias de optimización programadas para los agentes son realmente óptimas: los agentes del mundo real son a menudo mucho más sutiles que los agentes artificiales⁵.

La **dinámica de negocios** [9, 10, 11] es un procedimiento filosóficamente próximo a la simulación por agentes. Aquí se pretende simular, basándose en técnicas inicialmente desarrolladas en el campo de la regulación automática, el comportamiento dinámico a lo largo de meses y años de los agentes del mercado. Comparte gran parte de los méritos y desventajas de la simulación por agentes. Existen en el mercado herramientas informáticas orientadas a la especificación y simulación de estos modelos. Normalmente adolecen también de dificultades para el modelado de discontinuidades en los procesos. Esta técnica ha sido muy recomendada por diversos consultores, sobre todo para la valoración de la estrategia a largo plazo. Es a menudo defendida como útil para ganar una comprensión más profunda del comportamiento del mercado, más que para la realización de predicciones específicas.

Los modelos que se describen a continuación aspiran al cálculo explícito del equilibrio del mercado. Entre ellos, una clase extraordinariamente influyente es la llamada de “equilibrio en funciones de suministro”. En este tipo de modelos, las acciones de los agentes son la curva de oferta que presentan al mercado, real o hipotético. En el caso peninsular español, se puede asimilar esta curva a la curva de oferta completa que las compañías envían a OMEL para cada hora del día siguiente, si se desprecian los mercados subsiguientes.

En un artículo clásico, Klemperer y Meyer [12] demostraron que, en el caso idealizado de muy elevada incertidumbre de la demanda y un mercado de un

⁵Quizá sea necesario añadir que se han propuesto modelos que, aunque no cualifican como “simulación por agentes” en el sentido informático del término (no existen módulos específicos para ningún agente dado, ni un entorno virtual explícito), sí lo son desde el punto de vista de su filosofía [8].

solo período, el equilibrio en funciones de suministro existe y es único. Más tarde, Green y Newbery [13] aplicaron estos resultados al antiguo mercado de Inglaterra y Gales, donde era particularmente adecuado debido a la naturaleza de sus reglas (una única curva de oferta que se empleaba para todas las horas). Posteriormente, ha habido una plétora de variantes de esta idea.

Una dificultad de este tipo de modelos es que el cálculo del equilibrio es extremadamente complejo: por ello Klemperer y Meyer solamente analizaron el caso monopériodo, e incluso aquí introdujeron simplificaciones adicionales. Un intento de superar estas limitaciones es el modelo MARAPE [14]. Este modelo es el antecesor directo del modelo empleado en el Libro Blanco. Debido a las complicaciones adicionales introducidas en el modelo a fin de representar el sistema peninsular español, este modelo no calcula un equilibrio en funciones de suministro *sensu stricto*, aunque intenta aproximar uno.

Una limitación de este tipo de modelos en el contexto del mercado español es que las reglas que justificaron su uso por Newbery y Green para el análisis del mercado inglés no se dan en éste. En particular, el mercado español admite una oferta distinta para cada hora. La generalización más inmediata del modelo de Klemperer conduce a la existencia de una infinidad de equilibrios, lo que es obviamente de escaso valor predictivo. De otra manera, existen consideraciones adicionales que determinarían un hipotético equilibrio del mercado español⁶.

Otro tipo de modelos muy utilizados son los basados en **respuestas conjeturales**⁷ [15, 16]. En estos casos, es suposición del modelo el valor en que cambia el precio del mercado cuando algún agente modifica su producción: la respuesta conjetural⁸.

Estos modelos son muy flexibles, incluyendo ciertos modelos muy tradicionales en la literatura de Economía Industrial (Cournot, Stackelberg, Bertrand, ...) [17] como casos particulares. Se pueden formular como los llamados Problemas Complementarios [18, 19] y, en ocasiones, Problemas de Optimización con Restricciones de Equilibrio [20], o Problemas de Optimización Convexos [21]. Estos problemas han sido muy estudiados en Investigación Operativa, por lo que existen algoritmos y códigos industriales a disposición de los analistas. El caso de competencia perfecta corresponde a un valor específico de la respuesta conjetural (cero), lo que facilita la comparación del caso de interés con esta referencia.

El punto débil de estos modelos suele ser el de especificar un valor concreto para la respuesta conjetural. En ocasiones, se pueden inferir valores del análisis estadístico de la información histórica, lo que puede ser inadecuado cuando se

⁶Otra consideración, de carácter terminológico, es que existen muchos modelos que pertenecen a lo que en este documento se denominan modelos de “respuesta conjetural”, que en la literatura se denominan de función de suministro.

⁷De nuevo, hay aquí problemas terminológicos. Variaciones conjeturales es un término muy habitual, pero inicialmente reservado para una subcategoría especial de estos modelos, por lo que algunos autores objetan la generalización del término. Otros autores, como los autores del Libro Blanco, prefieren el término “parámetro estratégico”, para evitar posiblemente ciertas connotaciones no relevantes en su modelo.

⁸Existen publicados también modelos basados en parámetros equivalentes, como lo que cambia la producción de los competidores al cambiar la producción de un agente dado.

está analizando el posible efecto de cambios significativos del sistema. En el muy largo plazo, se puede argumentar que su valor estará dominado por la respuesta de la demanda, pero entonces existe el problema de modelar los mercados de futuros y, posiblemente, el proceso de inversión. Con todo, son modelos potencialmente muy flexibles, capaces de acomodar las restricciones físicas reales de los sistemas eléctricos y, usados con sentido, también restricciones e incentivos económicos.

3 Limitaciones

Por tanto, aún cuando los modelos de simulación de mercado se hayan convertido en una herramienta analítica imprescindible, padecen todavía de serias limitaciones que afectan a la fiabilidad de estas predicciones. Claramente, la gravedad de estas limitaciones depende de las características particulares del mercado analizado. Por otra parte, diversos modelos logran superar, total o parcialmente, algunas de las limitaciones que se describen a continuación, aunque ninguno la totalidad de las mismas. Es tarea del analista el tener presentes estas características del mercado, limitaciones específicas del modelo y tipo de análisis requerido, al realizar sus estudios.

3.1 Respuestas conjeturales

Como se ha comentado anteriormente, el tipo de modelo más flexible y potente en la actualidad es el basado en respuestas conjeturales. Un problema crítico es entonces la estimación del valor de esta respuesta.

Una primera vía es a partir de datos históricos del mercado [22]. En principio, la respuesta conjetural en el corto plazo no es nada más que la pendiente de la curva de demanda residual de cada agente, por lo que un análisis histórico de estas curvas, que busque su dependencia de la demanda horaria, la hidráulica, el estado de los mantenimientos u otras variables relevantes puede ser adecuado. Tiene el inconveniente general de todos los métodos estadísticos: hay que suponer que el futuro será como el pasado, lo que puede ser discutible en circunstancias de fuerte cambio estructural o regulatorio.

Un problema adicional en el caso del mercado español es la relativa dificultad de acceso a la información requerida. Por ello se han propuesto métodos alternativos basados en información fácilmente accesible, tales como los precios de casación. Estos métodos, que se pueden denominar de “respuestas implícitas”, derivan el valor de estos parámetros imponiendo que los resultados del modelo, cuando empleado para analizar situaciones históricas, coincidan con la operación histórica real del sistema⁹ [23]. Además de compartir la crítica general anterior a los procedimientos estadísticos, tiene el inconveniente que no facilita la detección de deficiencias de modelado.

⁹El término “implícito” se propone por analogía con el procedimiento empleado por analistas financieros para determinar las “volatilidades implícitas” (o “implicadas”) a partir de un modelo de valoración teórico, como Black-Scholes, y los precios reales de derivados financieros.

Por estas razones, en estudios de corte regulativo, se pretende normalmente estimar el valor de las respuestas conjeturales de forma endógena. Como se comentó en el capítulo anterior, una forma es a partir de procedimientos inspirados en modelos de equilibrio en funciones de suministro, que *a priori* no se adaptan bien a la estructura del mercado español. Pueden justificarse en la medida que se considere que la regulación es secundaria con respecto a la estructura (al menos dentro de los límites de las modificaciones regulativas discutidas). Aunque hay mucho que argumentar a favor de este punto de vista, es curioso que se adopte al discutir nuevas medidas regulativas.

Otra vía no estadística se basa en consideraciones de equilibrio a largo plazo, sea al considerar el proceso de inversión [24] o el de la operación de mercados a plazo [25]. En ambos casos, se puede argumentar (aunque solamente “demostrar” en modelos extremadamente simplificados) que el equilibrio de corto plazo es coherente con un equilibrio de largo plazo dominado por la respuesta de la demanda, como el conocido como equilibrio de Cournot. El problema aquí es que las elasticidades de la demanda no son bien conocidas, aunque existen estudios econométricos que proporcionan alguna guía [26, 27, 28]. Otra crítica es que hay que suponer que el mercado está ya operando en torno al equilibrio de largo plazo, lo que es discutible en el presente régimen transitorio. Además, y en cualquier caso, en el muy largo plazo el modelado de la dinámica aportada por posibles nuevos entrantes es claramente importante, y también muy poco estudiado.

En cualquier caso, y con las precauciones indicada, el autor opina que esta última vía es la más adecuada para el análisis de posibles regulaciones. También, desde un punto de vista práctico, ha sido adoptada en numerosos estudios en España [29, 30] y en el extranjero [31, 32, 33, 34].

3.2 Restricciones inter-temporales

Muchos de los modelos propuestos en la literatura son, en su planteamiento, modelos monopériodo. Existiendo más de 8000 horas (y por tanto precios horarios) durante el año, estos modelos se resuelven de forma sucesiva e independiente para cada una de las horas¹⁰.

El problema de este proceder es que se desprecian la existencia de restricciones intertemporales que ligan la operación de unas horas con otras. Entre ellas, se pueden destacar:

- **Restricciones de operación hidráulica:** Es preciso administrar las aportaciones recibidas a lo largo del año hidráulico (que empieza en septiembre) a lo largo de dicho año: el agua que se turbinan en un período no se puede volver a turbinar más adelante.
- **Cupos de carbón nacional:** que han de utilizarse durante un año natural.

¹⁰En ocasiones se agrupan horas de características similares a fin de disminuir la carga computacional del proceso.

- **Los Costes de Transición a la Competencia:** que se calculan también sobre los resultados de mercado de un año natural.
- **Restricciones técnicas de grupos térmicos:** tales como rampas, tiempos de arranque y parada, y otras limitaciones a su flexibilidad de operación. También el hecho de que se incurra por el hecho de arrancar y parar en costes específicos, y que estos costes deban ser recuperados durante todas las horas de operación, implica la existencia de un acoplamiento inter-temporal.

De particular relevancia en el caso español son las restricciones hidráulicas, debido a la asimetría en la capacidad de modulación de la producción de las centrales hidro-eléctricas¹¹. Desde el punto de vista del análisis del poder de mercado, es la componente modulable la más crítica.

No obstante, se disponen ya de modelos capaces de simular este tipo de restricciones de manera eficiente.

3.3 Incertidumbre

Como en cualquier actividad económica, la operación de los mercados de energía eléctrica tiene lugar en un entorno de incertidumbre respecto al futuro. Existen, sin embargo, algunas consideraciones que son específicas de estos mercados.

Un primer problema con estos mercados es que, en el caso español, existe un escaso volumen de contratación en los mercados de plazo de electricidad¹². Por tanto, es preciso realizar supuestos sobre la aversión al riesgo de los agentes. Una suposición habitual en la literatura, defendible también en estudios regulativos, es suponerles neutrales al riesgo. No obstante, este tipo de suposición lleva a serios problemas, específicamente en casos como los estudios de garantía de suministro.

En el medio plazo las principales fuentes de incertidumbre son los precios de los combustibles, la hidráulidad, el crecimiento de la demanda y, desde este año, el precio del dióxido de carbono. En general, los modelos tratan con estas fuentes de incertidumbre, cuando lo hacen, mediante técnicas de Montecarlo¹³. Es bien conocido que este procedimiento es teóricamente incorrecto, aunque el autor solamente conoce un modelo que implante la técnica más rigurosa de simulación mediante un árbol de escenarios¹⁴ [35].

¹¹Es preciso conocer no solamente de cuanta generación hidráulica se dispone, si no también la facilidad de su almacenamiento. Se distingue así entre producción “fluyente” y “modulable”, y dentro de esta última aquella que es almacenable en horizontes diarios, semanales, anuales o incluso hiperanuales.

¹²Este tema se vuelve a discutir más adelante. Existen mercados de futuros de electricidad líquidos en otros mercados. La falta de desarrollo de los mismos en España es, en opinión del autor, una de las mayores deficiencias del actual mercado.

¹³Es decir, realizan numerosas simulaciones deterministas para distintos escenarios de evolución de los factores de riesgo.

¹⁴En estudios de equilibrio de mercado oligopolista en el medio plazo. Existen numerosos modelos de este tipo para el análisis de mercados en competencia perfecta y algunos que tratan el problema de elaboración de ofertas o gestión de cuencas hídricas.

Las distorsiones que este proceder implica no son, en general, fáciles de valorar. Probablemente se pueden considerar de importancia secundaria en estudios regulativos de análisis de poder de mercado. Son seguramente de importancia para el análisis de la garantía de suministro y para fines de gestión empresarial.

3.4 Efectos de red

La existencia de una red de transporte conlleva dos efectos: la aparición de pérdidas de transporte y la posible aparición de congestiones. El primer tema tiene un “sabor” muy técnico, y requiere una solución adecuada a fin de incentivar la instalación de las plantas de generación en las localizaciones geográficas óptimas. Sin embargo, el despreciarlas o tratarlas de forma poco rigurosa no suele conllevar graves distorsiones de los resultados de simulación de mercados, ciertamente no en el caso español.

No ocurre así, en general, con las congestiones. La posible existencia de congestiones es crítica en la valoración del poder de mercado de los agentes. Por ejemplo, cuando una o más líneas están congestionadas pueden aparecer áreas aisladas y, por tanto, existe demanda que solamente puede ser cubierta por un número reducido de generadores. Así pues, se incrementa el poder de mercado, ya que es relativamente fácil para estos agentes el subir los precios en el área aislada, independientemente de la competitividad del resto del sistema [36, 37].

En España, estos problemas son relativamente menores¹⁵. Existen problemas locales de congestión, que podría llevar a situaciones de abuso de poder de mercado que no se han dado o se han dado en forma reducida, quizá debido a una amenaza regulatoria implícita. Por ello, la mayor de los modelos de simulación aplicados al mercado peninsular español son modelos de nudo único¹⁶.

La próxima implantación del MIBEL, que parece poder representarse mediante una red de dos nudos (España y Portugal) cambiará esto¹⁷. También podría ser necesario modificar los modelos si, como consecuencia de algún cambio regulatorio o de estructura, las empresas empezaran a explotar el poder de mercado que poseen asociado a la gestión de restricciones.

Se han desarrollado modelos capaces de tratar estos problemas, que plantean de todas formas enormes desafíos conceptuales y computacionales.

¹⁵No así en la red continental europea. Desde el punto de vista eléctrico, la Unión Europea se puede asimilar a un núcleo organizado en torno a Francia, Alemania y el Benelux, rodeado de “islas”: Gran Bretaña, Iberia, Escandinavia y, en menor medida, Italia; y de una zona en proceso de fusión con el núcleo: los Nuevos Estados Miembros (salvo los países bálticos). De todas las “islas”, la más insular eléctricamente hablando es Iberia. Hay analistas que esperan que un mercado competitivo aparezca en Europa debido a la competencia, en una misma red, de varios “campeones” nacionales. Por lo dicho arriba, tal eventualidad parece improbable en el caso español, aunque en opinión del autor sería muy deseable una ampliación de la capacidad de las conexiones con Francia.

¹⁶En ocasiones se alega también el carácter de “nudo único” del mercado diario. No obstante, si existieran congestiones de red apreciables, los precios y coste asociados aparecerían en cualquier caso en los mecanismos de gestión de restricciones, y de ser significativos tendrían que ser considerados en la herramienta de simulación.

¹⁷Aunque sigue sin ser público el mecanismo de gestión de restricciones (coordinación de mercados, subastas explícitas de capacidad, *countertrading*, ...) que se aplicará.

3.5 Cuencas hidráulicas

La existencia de cuencas hidráulicas compartidas por varios agentes plantea graves problemas, debido a que el agente que turbinas aguas arriba llena los embalses del agente aguas abajo, que puede verse obligado a realizar una operación no deseada. En el sistema español, aunque existen algunas cuencas de propiedad compartida, no se han dado problemas graves en este sentido, aunque la situación podría cambiar con la entrada en vigor del MIBEL. En otros países, situaciones de este tipo han acabado a menudo en los Tribunales de Justicia.

Desde el punto de vista más fundamental existe un problema relativo a la falta de definición clara de los derechos de propiedad sobre el agua turbinada. Desde el punto de vista del modelado, el tema es complejo, habiendo recibido muy escasa atención en la literatura¹⁸.

3.6 Restricciones de integralidad

El modelado correcto de la operación de los mercados eléctricos requiere que se tenga en cuenta que la operación física de ciertos equipos requiere la introducción de variables enteras. Por ejemplo, una planta puede estar acoplada o no, pero no acoplada a medias.

La introducción de estas restricciones complica muchísimo la resolución computacional de los problemas, pero además puede causar serias dificultades conceptuales (desaparición de equilibrios o multiplicidad de los mismos). En cualquier caso, se puede demostrar que en problemas muy grandes, del orden del mercado diario peninsular español, el despreñarlas no debiera introducir graves distorsiones en la simulación de la operación [39]. En cambio, pueden ser críticas en la simulación de la inversión y en la de mercados más pequeños.

3.7 Mercados sucesivos

La presencia de mercados sucesivos al diario suele ser ignorada en los modelos de simulación, que realizan la suposición a menudo implícita que el precio obtenido en la simulación representa tanto el precio del mercado diario como el de los intradiarios y, quizá, los mercados de reserva. En la medida en que el volumen de estos mercados es mucho menor que el del diario, esta suposición puede ser admitida.

Más problemática es la situación por el otro extremo de la escala temporal: los mercados a plazo. Estos mercados son casi inexistentes en el caso español¹⁹.

¹⁸No obstante, véase desde un punto de vista “casi” tradicional, [38], por ejemplo.

¹⁹Lo cual puede parecer sorprendente, a la luz de ciertos argumentos. Por ejemplo, Allaz y Vila [40] argumentan que estos mercados debieran crecer tan pronto como hubiera posibilidad legal y conducir a precios competitivos. Aunque su argumento es impecable desde el punto de vista lógico, su escasa entidad de hecho sugiere que alguna de sus hipótesis no refleja el mundo real. Una posibilidad es que no consideran la naturaleza repetitiva de estos mercados: se casan todos los días, no solamente uno. En estas condiciones, se pueden demostrar los llamados “folk theorems” [41], que prueban que existen muchos equilibrios posibles, incluyendo uno sin contratación a plazo.

El facilitar su aparición es, a juicio del autor, un urgente problema regulatorio. En cualquier caso, la inclusión de estos mercados a plazo en los modelos de simulación no es una propiedad general de los modelos. Se ha efectuado en algunos modelos que parten de la hipótesis de existencia de un mercado en competencia perfecta [42], existiendo muy escasa literatura que trate de simulación de mercados oligopolistas [43]. En general, la práctica habitual es considerar a los contratos a plazo como exógenos a los modelos de simulación de medio plazo, o modelarlos de forma simplificada o implícita en los modelos de más largo plazo.

3.8 Mercados de gas

En España, como en otros países, la mayor parte del crecimiento futuro de la capacidad de generación tendrá lugar mediante la instalación de centrales de gas de ciclo combinado. Existirá también una instalación significativa de generación renovable, que dado su elevado coste habrá previsiblemente de recibir subvenciones o, incluso, operar al margen del mercado.

Así pues, las interacciones con el mercado de gas pueden llegar a ser un tema muy relevante. Varios temas se pueden plantear aquí:

- Desde el punto de vista de la **comercialización**, las empresas de gas son un competidor creíble en el sector eléctrico y viceversa, debido al contacto habitual que mantienen con sus clientes [44]. El modelado de estos aspectos comerciales no suele estar incorporado en los modelos de simulación, o lo está a lo sumo mediante un contrato a plazo equivalente.
- Desde el punto de vista del proceso de **inversión**, se ha modelado el efecto que una expansión de la generación con gas natural puede tener en los precios del gas, así como los lazos de realimentación en sentido opuesto [9]. En los modelos estos lazos suelen llevar a la aparición o acentuación de ciclos de inversión.
- Desde el punto de vista de la **demanda a largo plazo**, es de esperar que la demanda de gas dependa del precio de la electricidad y viceversa. Existe escasa literatura econométrica sobre las elasticidades cruzadas, aunque no es inexistente [45, 46, 47]. A menudo, se desprecia (incluso por autoridades regulatorias) estos efectos basándose en consideraciones cualitativas de corto o medio plazo [48], lo que a juicio del autor es inapropiado. Dicho esto, no existe apenas literatura sobre el modelado de este tipo de efectos, que en cualquier caso requerirían un modelado adecuado conjunto con el mercado del gas.
- Desde el momento que los sectores eléctricos y gasísticos se puedan considerar acoplados, lo que dependerá de las condiciones técnicas y económicas específicas del sistema estudiado, existe la posibilidad de que las posibles distorsiones en un mercado se transmitan al otro. Una posibilidad relevante de distorsión en el mercado de gas está relacionada con el procedimiento de adjudicación del uso de gasoductos y regasificadoras, que en España es

esencialmente del tipo “first come, first served” con una penalidad administrativa y retirada de autorización por falta de uso. A juicio del autor, procedimientos de mercado como subastas de capacidad [49] son claramente preferibles. Con la regulación actual, una empresa con un número elevado de clientes de gas y centrales eléctricas de gas tiene una ventaja competitiva sobre una empresa que tan solo posea centrales eléctricas, que puede llevar a una operación económicamente ineficiente. En otro orden de cosas, la existencia de empresas con actividades simultáneas en mercados imperfectos de gas y electricidad posibilita la aparición de escenarios como creación artificial de volatilidad en ambos mercados para disuadir a posibles entrantes y subvenciones cruzadas entre mercados, modificando una compañía con activos en ambos mercados el reparto del gas que importe entre ambos.

4 Conclusiones

Los modelos de simulación de mercados de energía eléctrica son una herramienta fundamental de análisis. No obstante, presentan todavía apreciables limitaciones, por lo que su uso por las autoridades regulatorias debe estar sujeto a una crítica adecuada, que identifique en que medida subestiman o sobreestiman las posibles distorsiones a la competencia.

Referencias

- [1] Ventosa, M., A. Baíllo, A. Ramos, M. Rivier, “Electricity Markets modeling trends”, *Energy Policy*, 33(7), 897-913, 2005.
- [2] RBB Brief 17, “The Need for Reality Checks: An Example from the Netherlands”. Disponible en <http://www.rbbecon.com/publications/index.html>.
- [3] Fehr, N.-H. v. d. y D. Harbord, “Spot Market Competition in the UK Electricity Industry”, *Economic Journal*, 103, 531-546, 1993.
- [4] Ehrenmann, A., “Manifolds of multi-leader Cournot equilibria”. *Operations Research Letters* 32 (2), 121-125, 2004.
- [5] Joskow, P. L., “Electricity sector restructuring and competition: lessons learned”, *Cuadernos de economía*, 40, 121, 548-558, 2003.
- [6] Smeers, Y., “Market Power in Electricity”, *SESSA Meeting*, Stockholm, 2004. Disponible en <http://www.sessa.eu.com/public/conferences.php>.
- [7] Bower, J., D. W. Bunn y C. Wattendrup, “A model-based analysis of strategic consolidation in the German electricity industry”, *Energy Policy* 29, 987-1005, 2001.

- [8] Otero-Novas, I., C. Meseguer, C. Batlle y J.J. Alba, "Simulation Model for a Competitive Generation Market", *IEEE Trans. PWRs*, 15(1), 250-256, 2000.
- [9] Bunn, D. W., I. Dynen and E.R. Larsen, "Modelling latent market power across gas and electricity markets", *System Dynamics Review*, 14, 271-288, 1997.
- [10] Ford, A., "Estimating the impact of efficiency standards on the uncertainty of the Northwest electric system", *Operational Research*, 38, 580-597, 1990.
- [11] Sterman, J. D., *Business Dynamics. Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, McGraw-Hill Higher Education, USA 2000.
- [12] Klemperer, P. D. y M. A. Meyer, "Supply Function Equilibria in Oligopoly under Uncertainty", *Econometrica*, 57, 1243-1277, 1989.
- [13] Green, R. y D. Newbery, "Competition in the British Electricity Spot Market", *Journal of Political Economy*, 100, 929-953, 1992.
- [14] Batlle, C., "Análisis de riesgos asociados al negocio de producción eléctrica", *Tesis Doctoral*, Universidad Pontificia Comillas, Diciembre de 2002. Disponible en <http://www.iit.upcomillas.es/julian>.
- [15] Cabral, L. M. B., "Conjectural variations as a reduced form", *Economic Letters*, 49, 397-402, 1995.
- [16] Day, C.J., B. F. Hobbs y J.S. Pang, "Oligopolistic Competition in Power Networks: A Conjectured Supply Function Approach", *IEEE Trans. PWRs*, 17(3), 597-607, 2002.
- [17] Tirole, J. *The Theory of Industrial Organization*, MIT Press, Cambridge, 1988.
- [18] Hobbs, B.F., "Linear Complementary Models of Nash-Cournot Competition in Bilateral and POOLCO Power Markets", *IEEE Trans. PWRs*, 16(2), 194-202, 2001.
- [19] Rivier M., M. Ventosa y A. Ramos, "A Generation Operation Planning Model in Deregulated Electricity Markets based on the Complementary Problem", *International Conference on Complementary Problems ICCP*, Wisconsin, 1999.
- [20] Ventosa, M., A. Ramos y M. Rivier, "Modeling Profit Maximization in Deregulated Power Markets by Equilibrium Constraints", *Proceeding of 13th Power System Computing Conference PSCC*, Trondheim, 1999.
- [21] Barquín, J., E. Centeno, J. Reneses, "Medium-term generation programming in competitive environments: A new optimization approach for market equilibrium computing", *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 151(1), 119-126, 2004.

- [22] E. Centeno et alia, “Competitors Response Representation for Market Simulation in the Spanish Daily Market”, *Modelling Prices in Competitive Electricity Markets*, Wiley, London 2004
- [23] A. García-Alcalde, A., M. Ventosa, R. Denis, M. Rivier y A. Ramos, “Fitting electricity market models with a conjectural variations approach”, *Internacional Federation of Operational Research Societies IFORS*, Edinburgh, 2002.
- [24] Kreps, D. y J. Scheinkman, “Quantity Precommitment and Bertrand Competition Yield Cournot Outcomes”, *Bell Journal of Economics*, 14(2), 326-337, 1983.
- [25] Barquín, J., “Modelos de corto y largo plazo”, Informe técnico, 2003.
- [26] Taylor, L. D., “The demand for electricity: a survey”, *Bell Journal of Economic and Management Science*, 6, 74-110, 1975.
- [27] Filippini, M., “Swiss residential demand for electricity”, *Applied Economics Letters*, 6(8), 533-538, 1999.
- [28] Labandeira, X., J. M. Labeaga y M. Rodriguez, “A Residential Energy Demand System for Spain”, *Working Papers Series*, Departamento de Analisis Economico, UNED, 2004. Disponible en <http://www.uned.es/dpto-analisis-economico2/fichprof/labeaga/Documentos/ejllr.pdf>
- [29] Ocaña, C. y A. Romero, “Una simulación del funcionamiento del pool de energía eléctrica en España”, Comisión del Sistema Eléctrico Nacional, 1997. Disponible en <http://www.cne.es>.
- [30] Ventosa, M., M. Rivier, A. Ramos y A. García-Alcalde, “An MCP Approach for Hydrothermal Coordination in Deregulated Power Markets”, *Proceedings of the 2000 IEEE/PES Summer Meeting*, Seattle, 2000.
- [31] Scott, T. J. y E. G. Read, “Modelling Hydro Reservoir in a Deregulated Electricity Market”, *International Transactions on Operational Research*, 3, 243-253, 1996.
- [32] Borenstein, B., J. Bushnell, y C. Knittel, “Market power in electricity markets: Beyond concentration measures”. Univ. California Energy Institute, UCEI, PWP-0598, 1999.
- [33] Bushnell, J., C. Day, M. Duckworth, R. Green, A. Halseth, E. Grant Read, J. Scott Rogers, A. Rudkevich, T. Scott, Y. Smeers, H. Huntington, “An International Comparison of Models for Measuring Market Power in Electricity”, Energy Modeling Forum, Stanford University, 1999. Disponible en <http://www.stanford.edu/group/EMF/research/doc/EMF17.1.PDF>.
- [34] Barquín, J., E. Centeno, A. López-Nicolás, R. Quinteros, “Forecasting the Chilean short-term electricity market behavior under a new proposed regulation”, *IEEE Power Tech*, Bolonia, 2003.

- [35] Barquín, J., E. Centeno, J. Reneses, “Stochastic Market Equilibrium Model For Generation Planning, Probability in the Engineering and Informational Sciences”, 19, 533-546, 2005
- [36] Neuhoﬀ, K., et alia, “Network-constrained Cournot models of liberalized electricity markets: the devil is in the details”, *Energy Economics*, 27, 495-525, 2005.
- [37] Barquin, J., M. Vazquez, “Cournot equilibrium computation on electricity networks”, *2nd International Conference on Liberalization and Modernization of Power Systems: Congestion Management Problems*, Irkustsk, 2003.
- [38] Maceira, M.E.P., L.A. Terry, F. S. Costa, J. M. Damazio, A. G. C. Melo, “Chain of Optimization Models for Setting the Energy Dispatch and Spot Price in the Brazilian System”, *Power Systems Control Conference*, 2002.
- [39] Vázquez, C., “Modelos de casación de ofertas en mercados eléctricos”, *Tesis Doctoral*, Universidad Pontificia Comillas, Septiembre de 2003. Disponible en <http://www.iit.upco.es/personal/ficha.php?id=2048>
- [40] Allaz, B., y J.-L. Vila, “Cournot competition, forward markets and efficiency”, *Journal of Economic Theory*, 59, 1-16, 1993.
- [41] Liski, M. y J.-P. Montero, “Forward trading and collusion in oligopoly”. Próximamente en el *Journal of Economic Theory*. Borrador disponible en <http://mit.edu/ceep/2005-006.pdf>.
- [42] Fleten, S. E., S. W. Wallence and W. T. Ziemba, “Portfolio management in a deregulated hydropower based electricity industry”, *Proceedings of the Third International Conference on Hydropower*, Trondheim, Norway, 1997
- [43] Yao, J., S. S. Oren, I. Adler, “Computing Cournot Equilibria in Two Settlement Electricity Markets with Transmission Constraints”, *Proceedings of the 37th Hawaii International Conference on System Sciences*, 2004.
- [44] Commission Decision of 9.12.2004 declaring a concentration to be incompatible with the common market (Case No COMP/M.3440 . EDP/ENI/GDP). Disponible en http://europa.eu.int/comm/competition/mergers/cases/decisions/m3440_20041209_610_en.pdf
- [45] Asche, F., P. Osmundsen, R. Tveterås, “Energy taxes and natural gas demand in EU-countries”, *CESifo Working Paper No. 516*, disponible en http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=277362#PaperDownload
- [46] Jones, C. T., “A pooled dynamic analysis of interfuel substitution in industrial energy demand by the G-7 countries”, *Applied Economics*, 28(7), 815-821, 1996.

- [47] Nilsen O. B. “Estimating elasticities of demand for natural gas in the European household sector”, *Tesis Doctoral*, Norwegian School of Economics and Business Administration, Bergen, 2004. Disponible en <http://www.nhh.no/forskning/oppgaver/HAS-oppgave-NHH-obn.pdf>.
- [48] Quinto, J. de et alia, “Análisis Jurídico y Económico de la OPA de Gas Natural sobre Iberdrola”, Documentos de Trabajo en Análisis Económico, Universidad de la Coruña, disponible en <http://eawp.economistascoruna.org/archives/vol2n12/index.asp>.
- [49] Newbery, D. y T. McDaniel, “Auctions and trading in energy markets - an economic analysis”, *Department of Applied Economics, University of Cambridge* 0233, 2002. Disponible en <http://ideas.repec.org/p/cam/camdae/0233.html>