# El uso de simulaciones en el diseño de mercados de gas natural y electricidad

## Augusto Rupérez Micola

Departamento de Economía y Empresa, Universitat Pompeu Fabra, y Barcelona Graduate School of Economics

#### Resumen

En este trabajo se discuten algunos de los problemas de competencia que enfrenta la industria del gas natural, con especial énfasis en aspectos de diseño de mercado que afectan a la interacción con los mercados de la electricidad. Proponemos modelos computacionales basados en simulación de agentes como una metodología prometedora que combina el rigor del análisis microeconómico y de la flexibilidad necesaria para un diseño de mercado eficaz. Este artículo presenta una pequeña guía sobre cómo uno debe ir construyendo los modelos y discutimos ejemplos recientes de estas técnicas aplicadas a los mercados de la energía.

**Palabras Clave:** Gas natural, electricidad, diseño de mercados, simulaciones basadas en agentes. **Clasificación JEL:** Q40, C63, D2, D3.

#### Abstract

In this paper I discuss some competition issues facing the natural gas industry, with special focus on issues of market design influencing the interaction with electricity markets. I propose agent-based simulation models as a promising method combining the rigour of microeconomic analysis with the flexibility necessary for effective market design. I provide a short tutorial of how to go about building such models and discuss recent examples of these techniques to energy markets.

**Keywords:** Natural gas, electricity, market design, agent-based simulations.

JEL Classification: Q40, C63, D2, D3.

#### 1. Introducción

Desde el punto de vista económico, las industrias de gas natural y electricidad se caracterizan por tener competencia imperfecta, la elasticidad de demanda muy baja, funciones de oferta convexas y de forma discontinua, alta frecuencia de operaciones en el mercado abierto, empresas muy distintas y alto potencial de colusión (Wilson, 2002). Debido a esas razones, muchas de las técnicas estándar para estudiar otras industrias tienen en este caso serias limitaciones. En este trabajo de investigación, proponemos que modelos computacionales basados en simulaciones de agentes pueden ser un instrumento adecuado para analizar mercados energéticos, describimos algunos casos en los que se ha utilizado y proporcionamos una breve discusión sobre su aplicación práctica.

Las empresas y los reguladores hacen un uso cada vez más frecuente de técnicas de simulación como parte de la "ingeniería de mercado", en la cual la teoría de

juegos, experimentos y la economía computacional se complementan entre sí (Roth, 2002). La teoría de juegos proporciona un marco con el que abordar el diseño de mercados. Pero ese diseño también implica una cierta responsabilidad por el detalle, al tener que incluir el mayor número posible de complejidades presentes en los mercados reales. El manejo de estas complejidades requiere no sólo prestar una atención cuidadosa a las características institucionales, sino también nuevas herramientas que complementen los análisis teóricos tradicionales. Así, los expertos en el diseño de mercados suelen usar diferentes técnicas con una intención práctica, tratando de aprovechar lo mejor de cada una.

En un ejemplo de cómo la teoría y la práctica se combinan, Roth (2002) considera brevemente la relación entre la física y la ingeniería en el diseño de puentes colgantes. En el modelo teórico, la única fuerza es la gravedad y las vigas son perfectamente rígidas. El modelo es tan elegante y general como la teoría económica. Pero el diseño de puentes también requiere conocimientos de metalurgia, mecánica de suelos o la consideración de los efectos debidos a las fuerzas laterales del agua y el viento. Muchas de estas complejidades no se pueden resolver de forma analítica, sino que deben ser estudiadas usando otros métodos. La ingeniería se dedica a abordar dichas complejidades y su interacción con los modelos simples de la física. De hecho, es posible que la ingeniería sea a menudo menos elegante que el modelo simple subyacente, pero permite que los puentes se puedan construir más deprisa y sean más resistentes. El mismo tipo de principios se pueden aplicar en el campo del diseño de mercados.

Hay muchas aplicaciones conocidas en la teoría de juegos en el diseño de mercados. Por ejemplo, Kahn (1998) proporciona un resumen de varias técnicas numéricas para el análisis de poder de mercado en electricidad, con especial énfasis en modelos de equilibrio oligopolístico. Las simulaciones también han ayudado bastante en esta área. Entre algunos ejemplos se pueden mencionar el mercado de residentes médicos en los EE.UU. (similar al MIR en España) (Roth y Peranson, 1997), las subastas del espectro radio-eléctrico (Rothkopf et al., 1998), los trasplantes de riñón (Roth et al., 2004), la elección de escuelas públicas (Abdulkadiroglu et al.) y los nuevos mercados energéticos creados en muchos países. De entre todas las técnicas de simulación posibles, en este artículo nos centramos en los modelos computacionales basados en simulación de agentes (Agent-based Computacional Economics o ACE en sus siglas en inglés) y sus aplicaciones en casos de competencia en el mercado del gas natural, ya sea aisladamente o en su interacción con el de la electricidad. En el paradigma ACE, los mercados son modelizados como sistemas dinámicos de agentes (empresas, personas, operadores del sistema...) que interactúan a menudo dotados de racionalidad limitada. Este tipo de técnicas cada vez se usan más para diseñar mercados de gas natural y electricidad.

El resto de este trabajo se estructura del siguiente modo. En la Sección 2 discutimos la cadena de producción del gas natural y los problemas que puede presentar desde el punto de vista de diseño de mercados. En la 3 hacemos un esbozo de los modelos ACE y una discusión de sus ventajas e inconvenientes. En la 4 se discuten

algunas aplicaciones relacionadas con la coordinación entre los mercados del gas natural y la electricidad. Concluimos en la Sección 5.

#### 2. La cadena de producción del gas natural

El mercado del gas en Europa está organizado en una estructura vertical, con cuatro segmentos: producción, transporte y almacenamiento, distribución y suministro al por menor. Federico *et al.* (2008) nos dan una visión muy completa de la industria en España.

#### 2.1. Producción

El gas puede ser producido localmente o puede importarse. Hay dos principales centros de comercio de gas al por mayor en Europa Occidental, Zeebrugge en Bélgica y el Punto Nacional de Equilibrio (NBP) en el Reino Unido. Hasta hace muy poco el gas ha sido considerado como un sub-producto del petróleo. Sus costes han sido por tanto insignificantes desde el punto de vista contable y esto ha facilitado la expansión de la industria. Tradicionalmente, la demanda ha sido cubierta con gas local en aquellos países con reservas suficientes, y con importaciones en los que no las hay, como España. En este caso, los suministradores son Argelia o Noruega. En los últimos años, los precios del gas al por mayor en el Reino Unido han dependido principalmente de su valor como input en la generación de electricidad (por ejemplo, Stern, 1998). Como consecuencia, la dinámica del mercado diario está muy vinculada a la del mercado eléctrico al contado. En cambio, los precios en Europa continental han estado ligados a los contratos a largo plazo con cláusulas "take-or-pay" desde antes de que se iniciara la liberalización. Gas Natural tiene firmados varios contratos de este tipo con distintos suministradores. Los contratos "take-or-pay" obligan a los compradores a pagar una cantidad dada de gas en un periodo de tiempo largo, normalmente veinte años, independientemente de si al final se acaba consumiendo o no. Este tipo de contrato está pensado para garantizar un beneficio esperado a las inversiones de los países productores. En ellos, los precios suelen estar vinculados a los del petróleo o derivados.

Los problemas de regulación en el sector productor y de contratos al por mayor normalmente tienen que ver con cuestiones de exclusión vertical. Éstas pueden surgir porque los operadores históricamente monopolistas se reservan la mayoría de la capacidad de importación mediante contratos a largo plazo firmados hace años y/o debido a la integración vertical entre las diferentes etapas de la cadena de suministro y el mercado eléctrico. Los intentos de compra de Endesa por parte de Gas Natural fueron un ejemplo claro de una percepción frecuente por parte de las autoridades de competencia, de que este tipo de fusiones pueden suponer un riesgo de exclusión vertical importante.

Además, el crecimiento del comercio internacional de gas natural licuado (GNL) plantea la posibilidad de un desarrollo futuro de los mercados de gas al por mayor (o "hubs"), incluso en países con una producción limitada, y la perspectiva de "competencia entre gases". En ese sentido, la aparición de cárteles de la oferta en el mercado internacional, es una posible causa de preocupación para los organismos encargados de velar por la competencia. De hecho, el GNL ha creado por primera vez las condiciones para el desarrollo del mercado mundial del gas, este mercado comparte algunas similitudes con la industria del petróleo controlada por la OPEP. El recientemente creado Foro de Países Exportadores de Gas podría ser un intento de cartelizar la industria encabezado por Rusia e Irán. Entre los comentaristas políticos, se habla de que los participantes han aprovechado las subidas recientes en el precio del petróleo para llegar a acuerdos estratégicos relativos entre otros a los volúmenes de exportación, periodos de entrega, o la construcción de nuevos gaseoductos. También estarían en disposición de explorar y desarrollar conjuntamente vacimientos nuevos y coordinar la creación de empresas y programas de producción nacionales. La aparición de este tipo de cártel sería difícil de afrontar con herramientas legales convencionales debido a que los países consumidores no tienen jurisdicción sobre los productores, pero por lo que sabemos en el caso del petróleo, este tipo de asociaciones tienden a ser inestables en el tiempo. Las simulaciones pueden ayudar a estudiar bajo qué condiciones podría ser viable un acuerdo al estilo del Foro de Países Exportadores de Gas y cuál podría ser su comportamiento en el tiempo.

Otra área sobre la que se sabe poco, desde el punto de vista de diseño de mercado mayorista, es la medioambiental. En la actualidad, se están empezando a poner en marcha distintos mercados de permisos de emisión. Sus interacciones con los mercados eléctricos y, en consecuencia con los de gas natural, no están nada claras. Al mismo tiempo, es vital que estos mercados funcionen a pleno rendimiento en pocos años si entre todos tenemos que llegar a conseguir que se cumplan los objetivos planteados en los distintos tratados de Kioto.

## 2.2. Transporte, almacenamiento y distribución

El gas llega a Europa a través de gasoductos o por mar en forma de GNL. En la actualidad su comercio es relativamente limitado, excepto en el Reino Unido, pero las instalaciones de GNL recientemente construidas dependen menos que los gaseoductos de productores específicos. Esto significa que este tipo de gas podría ser negociado a gran escala con contratos flexibles en un futuro no demasiado lejano. La cuota de GNL en el consumo total de gas del mundo se espera que siga aumentando rápidamente al menos hasta el año 2020. España dispone de terminales de GNL en distintas localidades, como Barcelona, Cartagena y también en la cornisa cantábrica. En España el volumen de almacenamiento de GNL ha crecido desde 455.000 de metros cúbicos en 2000 a aproximadamente 2,5 millones en 2008 (fuente: http://www.sedigas.es/informeanual/2008).

Una vez que el gas es producido o importado, debe ser transportado a los consumidores en una red de alta presión, y luego en conducciones para distribuirlo regionalmente. Estas conducciones son también una buena forma de almacenamiento a corto plazo. Para el almacenamiento a largo plazo, por ejemplo para hacer frente a fluctuaciones estacionales de la demanda, las empresas suelen utilizar cavernas de sal o yacimientos agotados. Las redes de transporte, almacenamiento y distribución de gas están consideradas un monopolio natural ya que no pueden ser duplicadas de un modo económicamente factible, con lo cual se suele aceptar que se concentren en manos de un solo operador (en el caso de España Enagás).

Por esos motivos, la regulación se ha centrado también en cuestiones de exclusión vertical. Éstas pueden surgir porque los operadores históricamente monopolistas se reservan la mayoría de la capacidad de importación mediante contratos a largo plazo y/o debido a la integración vertical entre las diferentes etapas de la cadena de suministro y el mercado eléctrico. El problema de exclusión en el acceso a las redes es difícil de abordar, en ausencia de la plena separación de la propiedad de las redes de gas. Hasta hace poco éste era un problema importante en varios países europeos, como por ejemplo Alemania. Los gaseoductos entre mercados nacionales son todavía más complicados. Tomemos el caso de la congestión en la interconexión Bacton (Reino Unido)-Zeebrugge (Bélgica), prácticamente el único enlace entre los mercados continental y británico. Los mercados continentales están muy concentrados y sometidos a una liberalización lenta, pero el Reino Unido ha sido competitivo durante muchos años. Un análisis empírico reciente (Rupérez Micola y Bunn, 2007) identificó una relación convexa entre la utilización de la interconexión y la dispersión de precios entre uno y otro, que se produce en torno a un 55-60% de la capacidad de interconexión. Si se dispusiera de los datos de ventas de los propietarios de interconexión en los dos mercados locales, se podría estudiar de manera explícita la posibilidad de que estén reteniendo capacidad, lo que sugeriría la existencia de poder de mercado. Al no ser pública esta información, una alternativa sería hacer ejercicios de simulación.

#### 2.3. Comercialización

La etapa final de la cadena vertical incluye la comercialización y venta de gas a clientes finales. Normalmente se distinguen tres segmentos: hogares residenciales, industriales y comerciales, y generadores de electricidad que dependen del gas (en su mayoría porque utilizan turbinas de ciclo combinado). Estos mercados están, en principio, liberalizados en toda Europa y también en España. Gas Natural-Fenosa es la empresa dominante y otras empresas como Endesa o Iberdrola están intentando penetrar en el mercado.

Los problemas de competencia en la comercialización suelen surgir debido a la existencia de empresas establecidas cuyas posiciones dominantes no se han erosionado con la entrada de competidores. Esto suele resultar en niveles de concentra-

ción muy elevados, especialmente en mercados residenciales. La entrada de competencia residencial puede verse obstaculizada por la presencia de costes de cambio de suministrador por parte de los clientes, y también por las ventajas que disfrutan algunas empresas como propietarias de las redes de distribución, incluyendo ventajas de información o de reconocimiento de marca (Federico *et al.*, 2008). El hecho de que para la mayoría de consumidores residenciales la factura energética sea relativamente modesta hace que muchos no se tomen la molestia de buscar ofertas más competitivas que las que ya tienen, lo que incrementa los beneficios de la empresa dominante. El verdadero impacto de estas cuestiones en la competencia es difícil de cuantificar y puede poner en peligro los esfuerzos de liberalización. Las simulaciones podrían ayudar a entender la dinámica en estos mercados en la práctica, para abordar así cuestiones de concentración horizontal.

## 3. Modelos basados en agentes y el diseño de mercados energéticos

## 3.1. Modelos basados en agentes

La mayoría de economistas de la energía tratamos de comprender la estructura y el funcionamiento de los mercados a nivel nacional o regional, y la manera en que las políticas del gobierno tratan de influir en su estructura y rendimiento. Esto requiere en muchos casos un análisis sistemático de los bucles de retroalimentación en los comportamientos de las empresas, sus patrones de interacción, y las regularidades a nivel de mercado, tal y como se observan en el mundo real. Sin embargo, la microeconomía se basa en análisis estilizados en los que muchos detalles institucionales son difíciles de incluir. Por ejemplo, la presencia de múltiples equilibrios de Nash dificulta la interpretación práctica de muchos resultados, incluso en entornos sencillos. En el caso energético, el modelo de funciones de oferta tiene poco valor predictivo si el rango de variación de la demanda es limitado, porque casi todas las soluciones entre Cournot y la competitiva se sostienen en equilibrio (Bolle, 1992). Además, no hay una solución definida cuando no hay elasticidad de la demanda a corto plazo (von der Fehr y Harbord, 1998). Del mismo modo, a menudo hay muchos equilibrios en la configuración de las subastas por peldaños, usadas también con frecuencia en los análisis teóricos de estos mercados (von der Fehr y Harbord, 1993, Crawford et al., 2006).

El primer elemento de complejidad procede de su estructura. Los mercados energéticos presentan un enorme número de características institucionales con mucha importancia práctica. Los del gas se caracterizan por tener una muy baja elasticidad de demanda a los precios, funciones de oferta convexas y discontinuas, relaciones verticales y de sustitución con otros mercados como los del carbón o la electricidad, limitaciones a la importación, etc. Además, la mayoría de economistas no están familiarizados con aspectos de los sistemas de red de transmisión de energía, por lo que a menudo se concentran en sistemas muy simplificados con pocos

nodos, en lugar de incluir dinámicas más complejas debidas a las leyes de los circuitos eléctricos de Kirchhoff, por ejemplo. Y a la inversa, ingenieros no suelen conocer bien las características económicas y legales de los mercados de energía. Por estos y otros motivos, los métodos analíticos con frecuencia no pueden reflejar el mercado con el suficiente detalle.

El segundo elemento es que la representación de los agentes en modelos teóricos es en muchas ocasiones muy estilizada. Por ejemplo, la literatura experimental y empírica hace tiempo que indican que los supuestos de racionalidad perfecta y la capacidad ilimitada de cálculo no son una representación realista de cómo se comporta la gente. Los modelos de racionalidad limitada parecen funcionar mejor, especialmente en casos donde hay una interacción continua entre agentes. Además, resulta que los modelos racionales de mercados energéticos suelen producir soluciones múltiples. En esos casos es necesario elegir entre ellos. En términos generales, hay dos escuelas de pensamiento en el área de selección de equilibrios. Por un lado, tenemos la selección deductiva -basada en el razonamiento y la coordinación de puntos focales- y, por otra parte, tenemos métodos inductivos -basados en las dinámicas de adaptación propuestas por la teoría evolutiva de juegos-. Hasta hace poco, los principios deductivos han dominado la literatura. Los mecanismos inductivos, sin embargo, han demostrado que funcionan bien en la predicción de resultados experimentales, así que las dinámicas adaptivas simples a menudo ofrecen predicciones bastante realistas del comportamiento humano (van Huyck et al., 1990; Camerer y Ho, 1999, y Roth y Erev, 1995).

En este artículo proponemos el uso de simulaciones en la medida en que permiten abordar muchos problemas importantes, tanto desde el punto de vista de la política económica como del diseño de mercados. Este hecho las convierte en una alternativa a los métodos estándar cuando éstos son demasiado complejos para ser abordados en un marco más convencional. A mediados de la década de 1980 varios investigadores empezaron a desarrollar herramientas de cálculo basadas en simulaciones que incluyeran de modo convincente toda la complejidad de los fenómenos económicos del mundo real, mostrando además un especial interés en proponer modos de comportamiento alternativos a los perfectamente racionales. Estos métodos han recibido una gran atención en el campo de la ingeniería y, recientemente, empiezan a recibirlo en las ciencias.

En este trabajo me centro en modelos computacionales basados en simulación de agentes (Agent-based Computacional Economics o ACE en sus siglas en inglés). ACE es el estudio computacional de los procesos económicos como sistemas dinámicos en los que los agentes interactúan repetidamente. En este sentido, "agente" se refiere a una entidad residente en un mundo computacional construido a medida del problema que se quiere considerar. Empresas, agrupaciones sociales, instituciones y personas físicas pueden ser representados como agentes. ACE supone una manera muy experimental de estudiar los mercados. Una vez que las condiciones iniciales han sido especificadas y se ha dotado a cada agente de normas de comportamiento, todos los acontecimientos posteriores se rigen por interacciones entre ellos.

Estas interacciones —los intentos de los agentes de expresar acciones dentro de sus mundos— se determinan de forma dinámica en "tiempo de ejecución" de las estructuras internas de la simulación, en base a la información que tiene cada agente, en función de sus motivaciones y sus métodos de procesamiento de información. Algo esencial es que no es necesario que las interacciones se rijan a priori por la imposición de condiciones de equilibrio, las hipótesis de homogeneidad, u otros dispositivos de coordinación externa que casi nunca tienen referentes en el mundo real. Idealmente, los agentes deben ser libres de actuar dentro de sus mundos computacionales como alter egos de entidades reales. Las aplicaciones de ACE incluyen estudios, entre otras áreas, del mercado de valores, de las cadenas de suministro y la amenaza de la bio-guerras, o aquellos usados para la modelización de la propagación de epidemias y la aparición y posterior declive de civilizaciones antiguas. ¿Cuáles son las ventajas de estos métodos en el área de la ingeniería económica? ¿Podría la aplicación de este tipo de herramientas facilitar la aparición de un enfoque más pragmático en el campo de la modelización de mercados energéticos?

Mi respuesta a estas preguntas es que los modelos ACE tienen importantes ventajas que los hacen complementarios a los métodos económicos convencionales y, como consecuencia, pueden facilitar el diseño de mercados energéticos. De hecho, ya lo están haciendo. Véase Tesfatsion y Judd (2006) y el sitio web Leigh Tesfatsion para las fuentes de información amplia acerca de las técnicas ACE (<a href="http://www.econ.iastate.edu/tesfatsi/ace.htm">http://www.econ.iastate.edu/tesfatsi/ace.htm</a>). Las aplicaciones incluyen varios modelos encargados por grandes empresas (por ejemplo, Gaz de France, E. ON, Shell, y la Comisión de Competencia del Reino Unido), así como aquellos calibrados para el mercado de EE.UU., como el sistema de "mercado de electricidad adaptativos complejos "(EMCAS – Macal y North, 2005) y el" Modelo basado en agentes para sistemas de electricidad "(AMES – Sun y Tesfatsion, 2007). Weidlich y Veit (2008), así como Marks (2006) incluyen taxonomías generales de la literatura. Por tanto en esta sección daremos una visión general de la mecánica de las simulaciones y su implementación práctica.

#### 3.2. La mecánica de las simulaciones

Para que un modelo ACE pueda facilitar la comprensión del mercado real se deben cumplir tres criterios. En primer lugar, debe incluir una caracterización empíricamente adecuada de los agentes, principalmente empresas, así como las reglas del mercado. En segundo lugar, su escala debe servir al propósito para el cual se ha diseñado. En tercer lugar, sus especificaciones deben ser objeto de validación empírica en un intento de proporcionar una visión real de los mecanismos causales que conducen en última instancia a los resultados (LeBaron y Tesfatsion, 2008).

Un buen modelo ACE debe combinar la "tratabilidad" y el realismo en las cantidades adecuadas. A nivel general, se construyen de modo parecido a otras simulaciones numéricas. En primer lugar, es necesario identificar su propósito, las pre-

guntas que está destinado a responder y hacer participar en el proceso a los usuarios potenciales. A continuación, uno debe analizar sistemáticamente el mercado, identificar sus componentes, las interacciones entre ellos, así como otros aspectos relevantes. También se debe decidir las normas que guiarán las decisiones de los agentes. A continuación, se describe una simulación estilizada pero que incluya todos los detalles necesarios para la comprensión del problema. Entonces empiezan las simulaciones y se llevan a cabo una serie de experimentos del estilo de "qué pasaría si" variando sistemáticamente los parámetros y supuestos incluidos en la simulación. Éstos pueden ser por ejemplo el impacto de una fusión anunciada, o la aplicación de nuevos instrumentos de regulación. Por último, hay que llegar a evaluar si el modelo y sus resultados son sólidos, para ello se usa el análisis de sensibilidad a diferentes escenarios. En el caso del gas natural, éstos pueden incluir proyecciones de la demanda, la realización o no de las infraestructuras de transporte de importación o supuestos sobre el grado de colusión entre países productores.

La práctica de las simulaciones requiere:

- 1) identificar a los participantes y obtener una teoría de su comportamiento que sea suficientemente representativa,
- 2) identificar sus relaciones, por ejemplo de dependencia o competencia, y utilizar una teoría de las interacciones resultantes,
- 3) decidir sobre la cantidad de información disponible a cada uno de ellos, y
- 4) definir la base de los comportamientos individuales así como los del mercado en general.

Más específicamente, este tipo de simulaciones normalmente proceden del modo descrito en la Figura 1.

Los modelos se pueden hacer pequeños, con un ordenador de sobremesa, o llevarlos a cualquier nivel imaginable utilizando servidores de gran potencia de cálculo. Simulaciones pequeñas sirven sobre todo para probar conceptos de diseño y también para la realización de numerosos análisis estilizados. Muchas veces son modelos simples, diseñados y desarrollados en un período de unos pocos meses con herramientas aprendidas en unas pocas semanas<sup>1</sup>. Pese a todo, es evidente que el realismo aumenta con el tamaño del modelo. De este modo, un primer modelo

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Lamentablemente, las técnicas de simulación ACE carecen por el momento de una serie de estándares como los que forman parte de otras más utilizadas. Así, en muchos casos, el trabajo relacionado con la búsqueda, comprensión y modificación de un modelo existente es tal que, en la práctica, muchos modelizadores prefieren escribir su propio código en lugar de depender del de otra persona. Esto significa que muchos modelos se escriben a propósito para analizar situaciones concretas. Este tipo de modelos, muchos de ellos a pequeña escala, se escriben en lenguajes de programación generales. De entre ellos, C++ y Matlab son los más utilizados. Esto se debe principalmente a que han sido tradicionalmente utilizados en diferentes contextos y, por tanto, los costes de aprendizaje de quienes escriben el código son modestos.

de referencia se puede ir particularizando con más detalle. Las simulaciones a gran escala van más allá y permiten que millones de agentes puedan adoptar comportamientos sofisticados e intercambios económicos múltiples. Estas simulaciones de gran formato son generalmente realizadas en entornos que utilizan herramientas específicas, requiriendo generalmente habilidades de programación avanzadas y recursos informáticos más complejos. De todos modos, gracias a importantes inversiones públicas en investigación y de desarrollo, muchos entornos de software están ahora disponibles libremente en Internet. Estos incluyen Repast, Swarm o NetLogo, entre otros<sup>2</sup>.

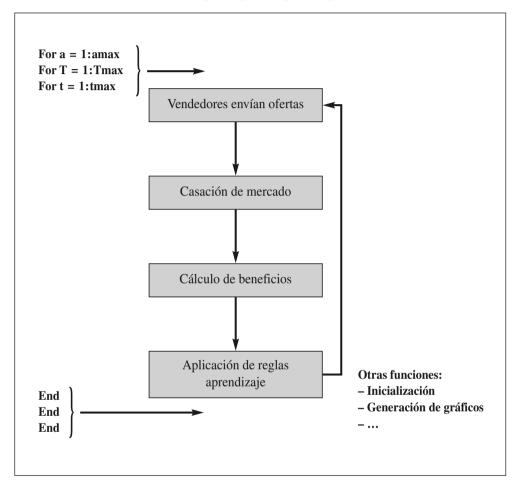
En un modelo típico a gran escala se utilizan agentes que capturen la heterogeneidad del mercado, representando de un modo realista las empresas de producción o generación, compañías de distribución, empresas de transporte, operadores independientes del sistema y consumidores (Macal y North, 2005). En este contexto, los agentes llevan a cabo diversas tareas mediante reglas de decisión especializadas. Por ejemplo, los importadores de gas o los generadores de electricidad aprenden en función de la respuesta del mercado a los precios que utilizan en las subastas de energía, intentan inferir las estrategias de sus competidores, y adaptan en consecuencia sus acciones. En su toma de decisiones pueden tener en cuenta parámetros tales como ingresos, beneficios o cuota de mercado. Todo esto se consigue en un entorno donde los agentes pueden estar limitados en sus acciones físicamente por la red energética u otros límites, por ejemplo impuesto por un regulador.

Para una combinación de parámetros determinada "a" hay una serie de agentes con el rol de vendedores que en la ronda "t" envían ofertas al mercado. En muchas ocasiones, también los compradores envían sus órdenes de compra, aunque éstas se suelen representar por simplicidad con una demanda agregada. Un agente operador del mercado se encarga de casar la oferta y la demanda, y cuando el procedimiento está acabado, el operador del mercado manda información a cada uno de los vendedores (y compradores, si están incluidos explícitamente en el modelo), los cuales calculan los beneficios obtenidos y aplican las reglas de aprendizaje que se les haya asignado. Cuando estos pasos se hayan llevado a cabo, la simulación se desplaza al periodo t+1 y vuelve a empezar. Las simulaciones se suelen realizar múltiples veces (Tmax) para cada una de las distintas (amax) combinaciones de parámetros.

Independientemente de que podamos utilizar nuestro propio código basado en un lenguaje generalizado o especializado, el modelo requiere unas especificaciones

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Swarm fue el primer desarrollo de software, y se lanzó en 1994 en el Instituto de Santa Fe. A raíz de la innovación Swarm original, RePast es un conjunto de herramientas que se ha utilizado ampliamente en aplicaciones de simulación social (North y Macal 2005). Así, los usuarios pueden construir simulaciones mediante la incorporación de componentes de la biblioteca Repast en sus propios programas o utilizando el entorno visual de programación. Incluye una variedad de características tales como un planificador de eventos discretos, un entorno de visualización del modelo, y herramientas de simulación de comportamiento adaptativo tales como redes neuronales y algoritmos genéticos. Sus aplicaciones a mercados reales están bastante extendidas.

FIGURA 1
ESQUEMA DE LA MECÁNICA DE SIMULACIONES
BASADAS EN AGENTES



sobre la forma de hacer ofertas en el mercado, características de la demanda, mecanismos para la casación de las unas y las otras, y modelos de comportamiento por parte de los participantes. La Tabla 1 incluye algunas de las más importantes, así como las opciones que se suelen tener al decidir sobre éstas en la literatura. En esta sección las discutimos brevemente y los lectores interesados en un análisis más detallado pueden referirse a Banal-Estañol y Rupérez Micola (2010).

TABLA 1
PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS
DE LAS SIMULACIONES BASADAS EN AGENTES

Representación de la oferta	Representación de la demanda	Normas de comportamiento de agentes
<ul> <li>a. Ofertas planas - von der Fehr y Harbord (1993)</li> <li>a.1. Una oferta por empresa</li> <li>a.2. Varias ofertas por empresa</li> <li>b. Funciones de oferta crecientes - Klemperer y Meyer (1989)</li> <li>b.1. Una oferta por empresa</li> <li>b.2. Varias ofertas por empresa</li> </ul>	<ul> <li>a. Demanda construida activamente con agentes y aprendizaje</li> <li>b. Demanda agregada</li> <li>b.1. Inelástica <ul> <li>b.1.a. Constante</li> <li>b.1.b. Variable</li> </ul> </li> <li>b.2. Elástica <ul> <li>b.2.a. Constante</li> <li>b.2.b. Variable</li> </ul> </li> </ul>	<ul> <li>a. Aprendizaje por refuerzo</li> <li>b. Mejor-respuesta</li> <li>b.1. Juego ficticio (FP)</li> <li>b.2. Estilo "Cournot" (BR)</li> <li>c. Otros algoritmos: sin inteligencia, algoritmos genéticos</li> </ul>

## 3.3. La simulación de la oferta y demanda, y su casación

La mayoría de los modelos de oferta utilizan subastas del tipo "por peldaños" (von der Fehr y Harbord, 1993) o adaptaciones del modelo de "funciones de oferta" debido a Klemperer y Meyer (1989). Estos modelos son también comunes en la teoría económica. En el enfoque "por peldaños", los vendedores presentan precios a los que están dispuestos a suministrar los tramos de capacidad. Un operador independiente organiza las ofertas de modo creciente y determina los precios marginales del sistema mediante la intersección de la demanda y la oferta. Se pueden utilizar tantas ofertas por planta como se desee, pese a que los modelos con una sola oferta por empresa son más comunes en la literatura estándar.

Rigideces inherentes al funcionamiento de activos eléctricos nucleares (por ejemplo, problemas de seguridad o costes marginales constantes) hacen que las empresas ofrezcan su capacidad de manera plana y a un precio muy bajo. Sin embargo, esta hipótesis es bastante restrictiva en comparación con la mayoría de mercados de energía, donde se pueden presentar muchos peldaños de oferta. Esta "multi-licitación" lleva a la conocida forma de stick de hockey de la curva de oferta. En consecuencia, hay también simulaciones con varias ofertas por planta, que suelen ser engorrosas debido a dos razones. En primer lugar, las operaciones del algoritmo de simulación crecen linealmente con el número de ofertas. En segundo lugar, la coordinación de los agentes es más difícil, lo que complica el aprendizaje y la convergencia hacia un estado estacionario que luego podamos caracterizar. El enfoque de "funciones de oferta" se aproxima a lo que pasa en el mercado con funciones crecientes, en un equilibrio entre una representación realista y la simplificación de los mecanismos de simulación.

En cuanto a la demanda de energía, ésta es a menudo inelástica, en parte debido a la falta de sistemas para medir el consumo en tiempo real (por ejemplo, Stoft, 2002). La demanda inelástica puede parecer una representación adecuada de la realidad, pero hay varias razones por las que la relajación de este supuesto podría agregar valor. En primer lugar, los mercados tienen cierto nivel de elasticidad implícita a través de las acciones de los operadores del sistema, los cuales pueden tomar medidas "fuera del mercado" para reducir la demanda si los precios suben demasiado. En segundo lugar, la mayor parte del volumen se comercializa fuera de mercados diarios, ya sea mediante futuros o bilateralmente. En tercer lugar, el uso de derivados financieros hace que la elasticidad de la demanda aumente. Por último, los modelos de demanda inelástica tienden a ser más difíciles de analizar teóricamente. Por estos motivos, hay bastantes expertos que prefieren modelizar mercados energéticos con demandas elásticas. De todos modos, parece que los resultados con mayor o menor elasticidad son en la mayoría de casos cualitativamente parecidos (e.g. Banal-Estañol y Rupérez Micola, 2010).

Una vez que los agentes han emitido sus ofertas, un subastador independiente fija el precio mediante la intersección de sus funciones agregadas. En el modelo por peldaños, se asigna plena capacidad a las ofertas por debajo del precio de mercado, la capacidad restante a los que ofrecen al precio de mercado, y asigna cero ventas a las ofertas por encima de dicho precio. En el caso de funciones de oferta, se le asigna plena capacidad a cada una de las partes, por debajo del precio de mercado. Las que están por encima del precio de mercado no reciben nada.

#### 3.4. La representación del comportamiento

Ésta es posiblemente la parte de la investigación que incluye las diferencias más importantes entre modelos ACE y otras técnicas. Dependiendo del propósito de la simulación, los agentes pueden tratar de maximizar su utilidad, bienestar o beneficios. Los modelos también pueden ser diseñados para tratar de maximizar los beneficios de un sub-grupo de empresas en el mercado, lo cual puede inducir a comportamientos de oligopolio. El elemento esencial de este tipo de modelos es que se usan para estudiar las implicaciones de comportamientos distintos de los perfectamente racionales. Esto es, el comportamiento de las empresas se simula utilizando algoritmos que representan bien el comportamiento humano en experimentos controlados, en lugar de asumir la racionalidad perfecta como en la mayoría de la literatura económica.

Por ejemplo, bastantes trabajos usan el aprendizaje por refuerzo ("reinforcement learning" o RL). Los modelos de refuerzo se basan en la ley del efecto, según el cual las acciones que resultan en consecuencias más positivas son más probable que se repitan en el futuro, y en la ley de la práctica, mediante la cual las curvas de aprendizaje tienden a ser pronunciadas al principio y luego se aplanan. Estas leyes son propiedades robustas observadas en la literatura sobre la psicología del aprendizaje humano.

Varios modelos han utilizado versiones modificadas del algoritmo propuesto por Roth y Erev (1995). En este método, los agentes refuerzan la acción seleccionada a través de un aumento en la propensión a jugar que se ajusta a los beneficios que ha generado en el pasado. Las acciones similares se refuerzan, en menor medida, siguiendo un proceso de "experimentación local" en la terminología de RL. Además, el algoritmo incluye un elemento de "olvido gradual," y las acciones cuya probabilidad es inferior a un determinado umbral se eliminan del espacio de elección, en lo que se viene a llamar "extinción en tiempo finito". Dado que el algoritmo de Roth y Erev (1995) es ampliamente utilizado y muy simple, sus resultados son más fácilmente comparables a los de otras simulaciones. Otra de sus ventajas es que no es necesario hacer suposiciones sobre la información que los jugadores tienen sobre las estrategias, la historia de juego y la estructura de los beneficios de los otros jugadores. En muchos casos los participantes en el mercado energético no se pueden observar entre ellos, y tienen que inferir las estrategias de sus contrarios de forma imperfecta a partir de la información que puedan disponer.

De todos modos, es probable que los operadores de los mercados energéticos reales presenten comportamientos más sofisticados, que deberían intentar incluir al menos comportamientos de "mejor-respuesta" a las acciones de sus competidores. La literatura especializada incluye dos tipos principales de algoritmos de mejor-respuesta: el juego ficticio (FP) y la mejor respuesta al estilo "Cournot" (BR)<sup>3</sup>. En FP (Brown, 1951), cada jugador asume que sus oponentes juegan estrategias fijas y, en cada ronda, el jugador responde a la frecuencia empírica del juego de su oponente desde que empezaron. BR implica que el jugador sólo responde a la acción de sus oponentes en el período inmediatamente precedente y olvida todo lo que aconteció hasta aquel punto.

Ya sea mediante RL, FP o BR, los cambios de comportamiento en simulaciones ACE de mercados energéticos se producen por la repetición de los dos pasos siguientes en cada período: los vendedores envían sus ofertas de acuerdo a distribuciones de probabilidad específicas sobre el conjunto de posibles precios. Para cada planta, tienen que elegir entre los posibles precios, que se encuentran entre sus costes marginales y un máximo precio que se pueda considerar "razonable". Cada posible curva de oferta individual es generada por una "acción". Las ofertas generadas por acciones más bajas son más competitivas, están más cerca de los costes marginales. La probabilidad de seleccionar una acción determinada en un periodo está dada por su propensión dividida por la suma de las propensiones de todas las acciones posibles. Una vez que se reciben las ofertas, un subastador independiente determina el precio de mercado por la intersección de la función de oferta agregada con la demanda realizada. Entonces, éste comunica los beneficios obtenidos por cada agente, los cuales modifican su comportamiento según las reglas que se hayan seguido, ya sean las de refuerzo, juego ficticio o mejor respuesta al estilo Cournot, y cada uno de ellos vuelve a enviar una oferta basándose en la nueva distribución de probabilidades.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> El modelo de Experience-Weighted Attraction (EWA) presentado por Camerer y Ho (1999) es un modelo general que incluye RL, FP y BR como casos especiales.

#### 3.5. Validación y robustez

Una de las ventajas de ACE es que los modelos están adaptados a cada situación, pero la abundancia de parámetros se convierte en una desventaja cuando se trata de comprender los factores que influyen en los resultados. Por ese motivo, la validación de las simulaciones es muy importante. Una forma de abordar este tema es la validación de entrada, es decir, garantizando que las condiciones estructurales, además de las disposiciones institucionales y de conducta, capturen los aspectos más destacados del mercado. En muchos casos, esta comparación consiste en analizar si las simulaciones en situaciones estilizadas producen resultados compatibles con los de la teoría económica. En un reciente artículo, Rupérez Micola y Banal-Estañol (2010) investigan si los supuestos de tipo de curva de oferta, elasticidad de la demanda y el comportamiento de los agentes afectan a los resultados de simulación y cómo son en comparación con algunas soluciones de equilibrio que se pueden obtener en entornos sencillos. Los resultados resultan ser buenos tanto si se usan ofertas por peldaños como funciones de oferta crecientes, así como con varias posibles elasticidades de demanda. Sin embargo, no todos los resultados son compatibles con las predicciones teóricas. El rendimiento del FP, se ve superado con creces por los BR y RL.

Una segunda manera de abordar la validación de un modelo ACE es analizando su poder descriptivo, es decir, comparando los resultados que se obtienen con resultados históricos en mercados reales. Una tercera forma de acercarse a la validación se basa en su poder de predicción, es decir, comparando los resultados actuales con resultados futuros en el mercado. Por ejemplo, Bower *et al.* (2001) utilizaron un modelo que ya había sido aplicado con éxito al comportamiento estratégico en el mercado de electricidad del Reino Unido, y lo calibraron al proceso de consolidación estratégica en Alemania durante los primeros años de la década del 2000. Pronosticaron que la creación de cuatro empresas dominantes, con la facultad de retirar la capacidad estratégica, se traduciría en un aumento sustancial de los precios en el mercado mayorista de la electricidad, de hasta el 87% en periodos punta y de un 50% en el promedio anual. Además, el impacto de un aumento de la concentración de la industria se vería agravado porque los generadores cerrarían algunas de sus plantas marginales. Esto fue en gran medida lo que sucedió en Alemania en los años posteriores.

En los últimos tiempos, varios investigadores han abogado por un enfoque basado en que ellos mismos trabajen codo con codo con las partes involucradas –por ejemplo, reguladores o empresas– en el desarrollo de la simulación; de un modo iterativo consistente en varias actividades: estudios de campo y análisis de datos reales, juegos de rol, simulaciones y experimentos con diferentes supuestos. Estas iteraciones servirían un doble propósito. Por un lado, se mejoraría la calidad y robustez del modelo. Por otro, sería más fácil que los responsables políticos se familiarizasen con la metodología, resultados y sus implicaciones, lo cual aumentaría su uso práctico.

## 3.6. Representación realista del mercado y resultados

La representación realista del mercado objeto de estudio empieza una vez que se ha validado una versión inicial del modelo. En ese caso, es importante incluir con suficiente detalle, por ejemplo mediante una representación calibrada de las empresas en cuanto a su tamaño y hasta posiblemente su tipo de actitud competitiva o propensión a la colusión. En muchos casos es posible incorporar la estructura real de la red de transmisión, tanto eléctrica como de gas, de modo que se puedan identificar sus correspondientes cuellos de botella y regiones en las que los precios se pueden desviar del resto de precios.

El paso siguiente consiste en la obtención e interpretación de los resultados. En un buen ejercicio de ACE se realizan muchas simulaciones para cada combinación de parámetros. Cada una de ellas suele converger a una serie temporal con cierta volatilidad. Normalmente se toma la media de esa serie temporal para representar el promedio a largo plazo de esa simulación en concreto. Haciendo muchas de ellas es posible obtener una distribución de los promedios de todas simulaciones para una combinación determinada de parámetros, la cual se puede estudiar utilizando herramientas estadísticas. Una vez que tenemos suficientes simulaciones bajo un conjunto de parámetros determinado, cambiamos uno de ellos y realizamos nuevas simulaciones manteniendo el resto constante. Cambios en la distribución de precios se pueden atribuir directamente al cambio del parámetro. El enfoque más usual es determinar si los precios obtenidos bajo una combinación de parámetros, por ejemplo antes de una fusión, son significativamente distintos de los que se obtendrían si ésta se llevara a cabo. Una vez que se haya hecho eso, es importante estudiar la robustez de los resultados en los demás parámetros. Por ejemplo es importante determinar que elementos son los más influyentes en la relación entre la fusión y los precios bajo supuestos de demanda alta o baja.

La parte final es obtener unos resultados coherentes y depurados en forma de recomendaciones. El espíritu de estos resultados tiene necesariamente que ser práctico y encaminado a proporcionar las herramientas necesarias para una toma de decisiones de acuerdo con los objetivos del regulador o de la empresa que esponsoriza el proyecto. Para ello es importante que, en los casos en los que eso sea posible, los resultados de modelos ACE se contrasten con los de metodologías alternativas como experimentos, analogías empíricas con mercados similares o soluciones teóricas.

## 4. Algunos modelos ACE de gas natural y electricidad

Como ya se ha discutido, nuestros conocimientos sobre el funcionamiento de los mercados del gas y la electricidad siguen adoleciendo de lagunas importantes. Por ejemplo, el problema de exclusión en el acceso a redes es difícil de abordar sin la plena separación de la propiedad de las redes de gas. Sería necesario en muchas ocasiones disponer de datos de ventas de los propietarios de interconexiones entre dis-

tintos mercados para poder estudiar de manera explícita la posibilidad de que estén reteniendo capacidad. Otros temas faltos de análisis son los relativos a la competencia horizontal. Específicamente, la competencia en el mercado residencial podría ser obstaculizada si los clientes sufren costes importantes al cambiar de suministrador, por las ventajas que pueden disfrutar las empresas como propietarias de las redes de distribución. Además, sabemos más bien poco sobre el funcionamiento de los mercados de permisos de emisión, especialmente en su relación con los mercados eléctricos y las implicaciones de un posible cártel de oferta en el mercado internacional del gas. Pese a la importancia de estas cuestiones —y muchos otros problemas— sobre el futuro de los mercados energéticos internacionales, la contribución de las técnicas convencionales a su resolución es probable que sea bastante modesta. Las simulaciones podrían contribuir a clarificar muchas de ellas.

En esta parte nos proponemos ilustrar el poder de métodos ACE con varios modelos en los que el enfoque está de algún modo en la interacción entre los mercados del gas y la electricidad. Empezamos con tres ejemplos estilizados y acabamos con una ilustración a gran escala del sistema eléctrico estadounidense. Hay dos motivos por los que los hemos elegido. Primero, todos ellos son modelos que conozco bien. Segundo, juntos conforman un amplio abanico tanto de técnicas ACE como de preguntas a las que se pueden aplicar y, por lo tanto, son bastante representativos de las simulaciones llevadas a cabo hasta ahora. Para una visión general más taxonómica de la literatura, el lector puede referirse a los artículos publicados por Weidlich y Veit (2008), y Marks (2006).

#### 4.1. Rupérez Micola y Bunn (2008)

La motivación del estudio de Rupérez Micola y Bunn (2008) se basa en cómo las participaciones cruzadas entre empresas energéticas pueden aumentar la coordinación de precios en los mercados europeos, con aplicaciones tanto para la electricidad y el gas natural. Las participaciones cruzadas han recibido tradicionalmente poca atención por parte de los reguladores. En la Unión Europea (UE), por ejemplo, la normativa aplicable no establece directrices claras. Se refiere a la adquisición de un "interés de control", pero no define su tamaño con más precisión (Unión Europea, 1989). Por lo tanto, se podría inferir que su supuesto implícito es que las participaciones cruzadas no afectan demasiado a los consumidores al ser individualmente pequeñas. Es decir, su efecto sobre los precios se supone que es convexo. Sin embargo, cualquier participación cruzada, por pequeña que sea, podría actuar como un dispositivo de comunicación entre las empresas, por ejemplo debido a que las empresas tendrían presencia mútua en sus consejos de administración, lo que podría traducirse en mayor coordinación a la hora de vender su energía en el mercado correspondiente. Si fuese ese caso, la relación entre el tamaño de participaciones y precios podría ser cóncava. Además algunos mercados, especialmente el Reino Unido y los nórdicos, han sido tradicionalmente muy transparentes mientras que otros son bastante opacos. Por ello, tendría sentido combinar la cuestión de las participaciones cruzadas con una investigación sobre si una mayor transparencia conduce a mayor o menor poder de mercado.

El contexto en el que estas cuestiones se deberían abordar (una subasta doble) describe bien bastantes aspectos de la venta de gas natural en Europa pero también incluye un gran número de equilibrios, por lo que es difícil obtener resultados útiles con los enfoques analíticos estándar. Por eso, se utilizan una serie de simulaciones para abordar estas cuestiones. En ellas, la forma de la relación entre el tamaño de las participaciones cruzadas y los precios resulta no ser convexa sino cóncava. Además, más información supone un aumento de precios. Una serie de implicaciones prácticas surgen del análisis: parece que los reguladores de energía de la UE pueden haber subestimado la relación entre el poder de mercado y "pequeñas" inversiones cruzadas. Para el futuro, las operaciones de propiedad parcial deberían estar sujetas a análisis de competencia más exigentes, especialmente en las partes más concentradas del mercado. Por otra parte, se hace evidente que la cantidad de información disponible en el mercado es un elemento clave en la limitación del poder de las empresas.

## 4.2. Rupérez Micola et al. (2008)

Este otro trabajo estudia las relaciones verticales entre los mercados del gas y la electricidad. Como es bien sabido, el gas es un input importante para la generación de electricidad, y por lo tanto están verticalmente relacionados. Ordover *et al.* (1990) demostró que una empresa integrada verticalmente puede beneficiarse de lo que se llama exclusión del mercado. En el mercado energético, esto quiere decir que si la unidad de gas deja de vender en el mercado, su rival se enfrentará a una menor competencia y subirá los precios. En consecuencia, aumentarán los del gas en el mercado abierto, lo que tenderá a aumentar los costes de la empresa eléctrica que no esté verticalmente integrada. Por lo tanto, ésta se verá obligada a reducir producción y aumentar precios, y la empresa integrada verticalmente podrá aumentar sus beneficios al aumentar tanto los precios como su cuota en el mercado eléctrico.

Estudios de las relaciones verticales en los mercados de energía suelen explicar sus hallazgos utilizando ese argumento de exclusión. Sin embargo, su lógica depende fundamentalmente de la capacidad de la empresa para internalizar las transacciones de mercado o para establecer un precio de transferencia interna que sea diferente del de mercado. En la práctica, los mercados de energía al por mayor a menudo son obligatorios, por lo que la internalización de comercio no es factible. Además, el mecanismo estándar es la subasta de precio uniforme, con lo que parece imposible hacer diferencias entre los precios internos y externos. Así, dos de los principales supuestos del mecanismo de exclusión no están presentes. Pese a todo, parece que hay poder de mercado vertical. ¿A qué se debe? Este artículo propone una alternativa a la exclusión por la cual la integración vertical puede conducir a precios más altos en los mercados de la energía.

La estructura de los precios del gas con frecuencia toma como referencia los de la electricidad. Éstos se establecen en relación a las tarifas del mercado minorista. La dinámica de mercado sugiere una relación secuencial en la que los mercados al contado de gas y la electricidad son liquidados de abajo a arriba, en lugar de seguir una formulación de "flujo físico", ampliamente adoptada por la literatura de exclusión, por la cual se determinan los precios de arriba antes que los de abajo. En el caso de la energía, hay buenas razones que apoyan la idea de que los precios se fijan de este modo. En primer lugar, los precios minoristas se acuerdan generalmente por períodos más largos que los precios al por mayor. Por ejemplo, en el Reino Unido, los consumidores no pueden cambiar de proveedor durante los veinte primeros días de la firma de un contrato, mientras que los precios al por mayor varían cada hora. En segundo lugar, la electricidad no se puede almacenar, pero su consumo y generación tienen que ser equilibrados en todo momento. Como consecuencia, la información sobre los volúmenes de consumo minorista tiene que fluir hacia arriba en la cadena de suministro a través de los precios y no pueden hacerlo mediante cantidades.

Con el fin de analizar los efectos de estas relaciones, el estudio usa una simulación con dos subastas obligatorias, relacionadas verticalmente, en las cuales los precios son uniformes y determinados uno después del otro. Las simulaciones identifican un mecanismo simple de poder vertical. Los resultados observables a nivel de mercado son similares a los del argumento de exclusión vertical. Sin embargo, una inspección más detallada de su micro-estructura, revela que las unidades eléctricas se comportan menos competitivamente, aumentando los precios a expensas de cuota de mercado, en lugar de tomar ventaja de los mayores costes de sus rivales, como sugeriría el argumento de la exclusión vertical. El resultado final es que hay poder de mercado vertical, a pesar de que la subasta sea a precio uniforme, sin internalización o discriminación de precios, como postulan las teorías convencionales. Las simulaciones ayudan a la comprensión de los elementos micro-estructurales que facilitan este mecanismo alternativo en el caso de la energía.

## 4.3. Banal-Estanol y Rupérez Micola (2009)

Este trabajo aborda la cuestión de si la composición tecnológica de las carteras de generación de electricidad tiene influencia en los precios de mercado al por mayor. Como es bien sabido, la industria eléctrica utiliza una amplia gama de tecnologías. Algunos generadores están diversificados y poseen instalaciones nucleares en la base de carga, así como unidades térmicas de coste más alto que normalmente funcionan con gas. Por ejemplo, Endesa posee plantas hidráulicas, nucleares, térmicas y renovables. También hay especialistas que se centran en una sola tecnología. Hasta hace poco, la cartera de generación de British Energy consistía exclusivamente en ocho unidades de generación nuclear (British Energy, 2006) y hay muchas empresas que se especializan en gas natural.

Un mercado en el que los generadores están especializados podría exhibir mayor poder de mercado porque la parte de la curva de oferta que determina el precio está con frecuencia concentrada en una sola empresa. Sin embargo, en los mercados eléctricos, los generadores especializados en tecnologías de alto coste tienen menos incentivos para usar su poder de mercado porque carecen de plantas de bajo coste para cosechar los beneficios. Por otro lado, las empresas diversificadas tienen incentivos para utilizar sus plantas de alto coste, para incrementar los precios y aumentar así los beneficios sobre la base de carga (nuclear, hidroeléctrica), pero pueden no tener la capacidad suficiente para hacerlo.

Este artículo usa una simulación en la que un duopolio tiene capacidades variables de tecnologías base y punta para abordar la cuestión de cómo la composición tecnológica de las carteras de generación influye en los precios del mercado diario. Así, para aislar los efectos de composición de carteras, se mantienen constantes las cantidades totales de cada tecnología. Las simulaciones identifican una relación no lineal entre la diversificación tecnológica y los precios. En situaciones de baja demanda, los precios bajan a partir de un punto de ruptura, mientras que, en los casos de gran demanda, una mayor diversificación conduce a precios más altos. Una vez que se obtienen los resultados de las simulaciones, la lógica económica a partir de la cual se logran parece aplastante, pero muy difícil de obtener ex-ante, de modo analítico.

#### 4.4. Modelo AMES

El último ejemplo es un modelo a gran escala, en este caso del mercado estadounidense. En 2003, la Federal Energy Regulatory Commission (FERC) en los EE.UU. propuso un nuevo diseño de mercado de electricidad que se debía implementar a nivel regional. Los mercados regionales de EE.UU. implican limitaciones físicas de transporte, protocolos de mercado complicados, y en muchos casos es difícil inferir a priori cómo se van a comportar las empresas que participen. Por otra parte, las series temporales son cortas. Además, los datos disponibles se han publicado con retraso y en ocasiones sólo de forma parcial, por ejemplo se han omitido en muchos casos los nombres de las empresas participantes. En consecuencia, estos mercados son difíciles de estudiar con herramientas estadísticas estándar.

Debido a todo ello, un equipo multidisciplinar de la Universidad de Iowa, incluyendo matemáticos, ingenieros eléctricos y economistas entre otros, se propuso simular posibles problemas que pudieran aparecer. Este modelo se ha dado en llamar AMES. Su funcionamiento esta pensado para reproducir de manera realista las grandes redes de transmisión de corriente alterna en los EE.UU., e incluye las configuraciones de cada mercado regional, sus conexiones, plantas, tecnologías, etc. El modelo permite el estudio experimental sistemático de los comportamientos estratégicos en mercados de energía al por mayor, intenta suplir la falta de resultados suficientemente generalizables a este mercado en particular y facilita un primer análisis empírico de lo que puede llegar a pasar bajo una gama amplia de escenarios.

Desde el principio, AMES fue diseñado como una aplicación de código abierto y desarrollado enteramente en el lenguaje de programación Java para facilitar su uso. Combina una colección de módulos básicos para su aprendizaje, módulos de simulación, representaciones gráficas y otras funciones, por lo que permite a los usuarios modificar y ampliar el código con relativa facilidad. Por ejemplo, se ha utilizado para investigar cómo la elasticidad de la demanda influye en el comportamiento del mercado. Los resultados muestran que, incluso con demandas elásticas, los precios son mayores de lo previsto por la teoría económica cuando se permite que los generadores utilicen algoritmos de aprendizaje como los descritos en estas páginas. Sus resultados son consistentes con lo que uno observa en los mercados reales estadounidenses. Una de sus implicaciones es que se debe incentivar que la demanda también sea activa. La simulación también se ha utilizado para mostrar que la imposición de un techo máximo en las ofertas no conduce necesariamente a una disminución de los precios finales. Además, el establecimiento de un nivel demasiado bajo en el nivel máximo de precios puede causar otros problemas tales como volatilidad o falta de suficiente capacidad de generación para satisfacer la demanda. Estas cuestiones en combinación con la topología de la red eléctrica estadounidense serían muy difíciles de estudiar con suficiente detalle de cualquier otro modo, va sea analítico, empírico o experimental.

#### 5. Discusión y conclusiones

En este trabajo se discuten algunos de los problemas de competencia que está afrontando la industria del gas natural, con especial énfasis en la interacción con los mercados de la electricidad. Los problemas desde el punto de vista de regulación en la industria del gas se han centrado con frecuencia en la exclusión vertical. Ésta puede surgir si los operadores monopolistas se reservan capacidad de importación mediante contratos a largo plazo y también si hay mucha integración vertical entre las diferentes etapas de la cadena de suministro y el mercado eléctrico. Los problemas de competencia a nivel de comercialización suelen surgir por la existencia de empresas con posiciones dominantes. Esto suele resultar en niveles de concentración muy elevados. La entrada de competencia en el mercado residencial puede verse obstaculizada por costes de cambio de suministrador, y también por las ventajas que disfrutan algunas empresas debido al acceso a la información y al reconocimiento de marca.

El verdadero impacto de estas cuestiones en la competencia es difícil de cuantificar y puede poner en peligro los esfuerzos de liberalización. Por eso, proponemos las técnicas de simulación basadas en agentes como un método prometedor que puede combinar el rigor del análisis micro-económico y la flexibilidad necesaria para una política económica eficaz. En especial nos preocupa la necesidad de conocimiento práctico de mercados reales, en lo que algunos han dado en llamar "ingeniería de mercado". Así ofrecemos algunas orientaciones de cómo se pueden construir

las simulaciones y discutimos ejemplos recientes de estas técnicas aplicadas a la interacción entre las industrias de la electricidad y de gas natural.

Es importante clarificar una cuestión. Estas técnicas probablemente deban ceder el paso a otras más consolidadas cuando éstas funcionen adecuadamente. Por ejemplo, es siempre mejor analizar datos de mercados reales que aquellos generados con simulaciones. También es preferible hacer estos experimentos con agentes reales antes que con agentes computacionales. Sin embargo, estas últimas simulaciones pueden ser útiles cuando las técnicas estándar fallan, y éstas tienden a fallar más cuando aumenta el nivel de realismo de la situación que se quiere describir. Esto puede no ser un problema desde el punto científico pero tiene inconvenientes palpables a la hora de crear y regular nuevos mercados. La mayoría de los escenarios reales son muy difíciles de resolver o presentan soluciones de difícil interpretación práctica, tales como equilibrios múltiples o en estrategias mixtas. Además, en los nuevos mercados no hay datos disponibles, simplemente porque el mercado todavía no funciona, y hay muchos casos en que los experimentos pueden ser demasiado costosos. En esos casos, los modelos con agentes pueden proporcionar un buen compromiso entre un nivel de detalle suficiente y la posibilidad de utilizar la teoría económica de un modo práctico. Además, avudan a entender no sólo los resultados en sí, sino también cuál fue su evolución y tienen la flexibilidad suficiente para no solamente representar a las empresas dentro del paradigma de racionalidad económica, sino también en base a supuestos alternativos. Por todo ello, hay muchas situaciones en las que los modelos ACE pueden ofrecer claras ventajas o responder preguntas pendientes que influyen en el día a día de los mercados energéticos.

¿Qué problemas pueden beneficiarse más de la utilización del enfoque ACE? Las aplicaciones más importantes se deberían dar en mercados en los cuales es importante que los participantes (empresas, reguladores, etc.) evolucionen juntos hacia una situación a largo plazo. También pueden ser útiles donde la complejidad y la posibilidad de detallar el modelo sean importantes, o donde las pautas de comportamiento dinámico deban surgir como resultado endógeno del modelo, más que como algo dado. Además, es útil usarlos en situaciones en las que se tiene una idea clara de las pautas de comportamiento de los agentes en el mundo real, ya sean empresas o particulares.

¿Hay una explicación causal para las regularidades que uno pueda observar persistentemente en el modelo? En términos del procedimiento cuasi-experimental, la respuesta es que sí, porque sólo cambiamos un factor a la vez. Sin embargo, ¿significa eso que los efectos identificados ocurrirían en el mundo real? Sí, si el modelo es suficientemente bueno y siempre dentro de los límites de la inferencia estadística, pero no hay certeza. Si el problema es tan importante que la "seguridad estadística" no es suficiente entonces tiene aún más sentido tratar de combinar la simulación con otros métodos, por ejemplo en casos de litigación en los tribunales. La estrecha analogía entre estas técnicas y los experimentos de laboratorio les hace complementos naturales. Además, la flexibilidad de los métodos ACE hace posible, y de hecho deseable, que se realicen pruebas sistemáticas sobre la solidez de sus resultados. También hay

que utilizar diferentes supuestos de comportamiento y tratar de comparar los resultados con los que pueda haber de tipo empírico, experimental o teórico. Esencialmente, es necesario para asegurar que los resultados reflejen los aspectos del problema y no los métodos o, algo bastante frecuente, un error en el programa informático.

En general, pienso que las técnicas basadas en agentes tienen un muy buen potencial para ayudar en el diseño de mercados de gas natural y electricidad. Varios trabajos científicos han mostrado que sus resultados coinciden con las soluciones de modelos teóricos en situaciones sencillas, al mismo tiempo que permiten avanzar hasta conseguir el grado de complejidad necesario. Su modularidad y la existencia de programas específicos hacen que incluso personas sin demasiada experiencia puedan empezar a simular de forma relativamente rápida. Estos métodos cuentan con varias aplicaciones interesantes ya en su haber y van a continuar siendo usados en el diseño de mercados energéticos.

#### Referencias bibliográficas

- [1] ABDULKADIROGLU, A.; PATHAK, P. A., y ROTH, A. E. (forthcoming): "Strategy-proofness versus efficiency in matching with indifferences: Redesigning the NYC High School Match," *The American Economic Review*.
- [2] BANAL-ESTAÑOL, A. y RUPÉREZ MICOLA, A. (2009): "Composition of electricity generation portfolios, pivotal dynamics and market prices". *Management Science*, vol. 55, issue11, pp. 1813-1831.
- [3] BANAL-ESTAÑOL, A. y RUPÉREZ MICOLA, A. (2010): "Are agent-based simulations robust? The electricity trading case," Universitat Pompeu Fabra Working Paper.
- [4] BOLLE, F. (1992): "Supply function equilibria and the danger of tacit collusion The case of spot markets for electricity". *Energy Economics*, vol. 14, n°. 2, pp. 94-102.
- [5] BOWER, J.; BUNN, D. W. y WATTENDRUP, C. (2001): "A model-based analysis of strategic consolidation in the German electricity industry." *Energy Policy*, volume 29, no. 12, pp. 987-1005.
- [6] CAMERER, C. y HO, T. H. (1999): "Experience-weighted attraction learning in normal form games". *Econometrica*, vol. 67, issue 4, pp. 827-874.
- [7] CRAWFORD, G. S.; CRESPO, J. y TAUCHEN, H. V. (2006): "Bidding asymmetries in multi-unit auctions: implications of bid function equilibria in the British spot market for electricity". Working paper.
- [8] FEDERICO, G.; VIVES, X. y FABRA, N. (2009): "Competition and regulation in the Spanish gas and electricity markets". IESE Business School document.
- [9] KAHN, E. (1998): "Numerical techniques for analyzing market power in electricity". *Electricity Journal*, 11 (6), pp. 34-43.
- [10] KLEMPERER, P. y MEYER, M. A. (1989): "Supply function equilibria in oligopoly under uncertainty", *Econometrica*, vol. 57, n°. 6, pp. 1243-1277.
- [11] LEBARON, B. y TESFATSION, L. (2008): "Modelling macroeconomies as open-ended dynamic systems of interacting agents," *American Economic Review*, Vol. 98, n°. 2, pp. 246-250.

- [12] MACAL y NORTH, M. (2005): "Tutorial on agent-based modeling and simulation", *Proceedings of the 37<sup>th</sup> Winter simulation conference*, pp. 2-15, ISBN: 0-7803-9519-0.
- [13] MARKS, R. (2006): "Market design using agent-based models," in Leigh Tesfatsion and Kenneth L. Judd (Eds.), *Handbook of Computational Economics*, vol. 2: Agent-Based Computational Economics, Handbooks in Economics Series, North-Holland, Amsterdam. ISBN: 13-978-0-444-51253-6.
- [14] ROTH, A. E. (2002): "The economist as engineer: game theory, experimentation, and computation as tools for design economics," *Econometrica*, vol. 70 (4), pp. 1341-1378.
- [15] ROTH, A. y EREV, I. (1995): Learning in extensive-form games: Experimental data and simple dynamic models in the intermediate term. *Games and Economic Behavior*, vol. 8, pp. 164-212.
- [16] ROTH, A. E. y PERANSON, E. (1997): "The effects of the change in the NRMP matching algorithm," *Journal of the American Medical Association*, pp. 729-732.
- [17] ROTH, A. E.; SONMEZ, T. y UNVER, M. U., "Kidney exchange," *Quarterly Journal of Economics*, vol. 119, issue 2, pp. 457-488.
- [18] ROTHKOPF, M. H.; PEKEČ, A. y HARSTAD, R. M. (1998): "Computationally manageable combinational auctions". *Management Science*, vol. 44, issue 8, pp. 1131-1147.
- [19] RUPÉREZ MICOLA, A. y BUNN, D. W. (2007): "Two markets and a weak link," *Energy Economics*, vol. 29, issue 1, pp. 79-93.
- [20] RUPÉREZ MICOLA, A. y BUNN, D. W. (2008): "Crossholdings, information and prices in capacity constrained sealed bid-offer auctions", *Journal of Economic Behavior and Organization*, vol. 66, issue 3-4, pp. 748-766.
- [21] RUPÉREZ MICOLA, A.; BANAL-ESTAÑOL, A. y BUNN, D. W. (2008): "Incentives and coordination in vertically related energy markets", *Journal of Economic Behavior and Organization*, vol. 67, issue 2, pp. 381-393.
- [22] STERN, J. P. (1998): "Competition and liberalization in European gas markets: A diversity of models," Royal Institute of International Affairs, London.
- [23] SUN, J. y TESFATSION, L. (2007): "Dynamic testing of wholesale power market designs: an opensource agent-based framework". *Computational Economics*, 30 (3), pp. 291-327.
- [24] STOFT, S. (2002): Power system economics: Designing markets for electricity. Wiley. ISBN: 978-0471150404.
- [25] TESFATSION, L. y JUDD, K. (2006): "Handbook of computational economics, vol. 2: agent-based computational economics". ISBN-13: 978-0-444-51253-6.
- [26] VAN HUYCK, J. B.; BATTALIO, R. C. y BEIL, R. O. (1990): "Tacit coordination games, strategic uncertainty, and coordination failure", *The American Economic Review*, vol. 80, n°. 1, pp. 234-248.
- [27] VON DER FEHR, N. y HARBORD, D. (1993): "Spot market competition in the UK electricity industry". *Economic Journal*.
- [28] WEIDLICH, A. y VEIT, D. (2008): "A critical survey of agent-based wholesale electricity market models," *Energy Economics*, 30 (4), pp. 1728-1759.
- [29] WILSON, R. (2002): "Architecture of power markets," *Econometrica*, vol. 70, issue 4, pp. 1299-1340.