

Modelos de subastas para mercados eléctricos

El problema del despacho en los sistemas de energía eléctrica tiene como objetivo decidir cuánto debe producir cada una de las unidades generadoras para dar suministro a la demanda de la forma más eficiente. La liberalización del sector ha transformado este procedimiento en una subasta en la que los generadores compiten entre sí por vender su energía a los consumidores. Sin embargo, los mercados eléctricos presentan algunas peculiaridades, consecuencia de las características técnicas de los sistemas eléctricos de potencia, que no son comunes a otros mercados y que no encajan directamente en los modelos sencillos de subasta. Este artículo explora las dificultades de la aplicación directa de la teoría económica de subastas a los mercados eléctricos e identifica las principales vías para resolverlas.



Carlos Vázquez

Ingeniero del ICAI. Investigador en Formación del Instituto de Investigación Tecnológica (IIT), ICAI, Universidad Pontificia Comillas.

Michel Rivier

Dr. Ingeniero del ICAI. Profesor en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI), de la Universidad Pontificia Comillas. Subdirector del Instituto de Investigación Tecnológica (IIT).



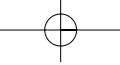
Ignacio Pérez Arriaga

Ingeniero Industrial por el ICAI, Universidad Pontificia Comillas. PhD y Master en Ingeniería Eléctrica por el MIT. Profesor propio ordinario de la ETSI del ICAI. Fue Vocal de la Comisión Nacional del Sistema Eléctrico.

Introducción

De forma extremadamente simplificada, se puede decir que un sistema eléctrico de potencia está formado por un conjunto de generadores y consumidores unidos entre sí a través de una red. El objetivo de todo este sistema es proporcionar a los consumidores la energía que requieran, que debe ser producida por los generadores. El proceso de decisión que se sigue hasta alcanzar este objetivo está compuesto por muchas etapas interdependientes con diferentes horizontes, desde el problema de planificación de largo plazo en el que se decide qué generadores construir, hasta el problema de control de muy corto plazo en el que se decide cómo mantener el equilibrio en tiempo real entre generación y demanda ante pequeñas perturbaciones. Uno de los pasos dentro de este proceso de decisión es el problema de la programación horaria, o unit commitment. El objetivo de este problema es determinar, en un horizonte diario o semanal, cuáles de los generadores existentes deben producir y cuánto para poder satisfacer la demanda de la forma más eficiente.

La industria eléctrica ha venido empleando desde hace décadas modelos de optimización [1] para resolver este problema. Este tipo de algoritmos permiten despachar los recursos del sistema con criterios de minimización de costes (es decir, con la máxima eficiencia económica) pero, al mismo tiempo, tienen en cuenta todas las características



MODELOS DE SUBASTAS PARA MERCADOS ELÉCTRICOS

técnicas y económicas de los grupos generadores y garantizan que a ningún generador se le va a asignar un programa de producción que le haga trabajar fuera de su zona de funcionamiento factible.

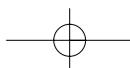
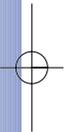
No obstante, los sistemas de energía eléctrica están viviendo en la actualidad un proceso de apertura y liberalización sin precedentes, que ha dado lugar a nuevos esquemas de organización del sector. En general, la motivación fundamental de estos cambios es conseguir que el funcionamiento de un sistema eléctrico se parezca mucho más al funcionamiento de cualquier otro sector de la economía (el mercado de los zapatos, por ejemplo), de modo que sean los propios agentes generadores y consumidores los que tomen las decisiones relevantes de la explotación del sistema y determinen, en función de los precios que vean en el mercado e intentando obtener más beneficios, qué inversiones quieren realizar, cuánto desean producir o consumir en cada momento, etc. En este contexto, el proceso tradicional de despacho tiende a transformarse en un mercado mayorista en el que los generadores compiten entre sí por vender la energía a los consumidores, que a su vez deciden cuánta energía adquirir en función de las diferentes ofertas que reciben. Es decir, en un entorno liberalizado el mecanismo del unit commitment se convierte en una subasta para la compra y venta de energía eléctrica. En la mayoría de los mercados existe una entidad responsable de realizar la subasta (que llamaremos

Operador del Mercado) que, basándose en las ofertas realizadas por los agentes, determina qué ofertas son aceptadas y calcula el precio del sistema. El diseño del modelo a emplear en la casación es una pieza fundamental para el buen funcionamiento global del mercado.

Existen algunos mercados liberalizados, como PJM (región de Estados Unidos que abarca los estados de Pennsylvania, New Jersey y Maryland), o Inglaterra y Gales antes de la reciente reforma que emplean un algoritmo tradicional de unit commitment para determinar el resultado de la subasta de energía eléctrica. El modelo recoge todas las ecuaciones y restricciones que definen el comportamiento del sistema y recibe, en forma de ofertas que realizan los agentes, las características técnicas y económicas de los diferentes equipos generadores. La gran ventaja de este tipo de modelos es su capacidad contrastada para modelar el sistema, para llegar siempre a la solución más eficiente y para garantizar que se respetan todas las restricciones de operación que las máquinas eléctricas tienen en la práctica. Sin embargo, su uso como modelos de subasta dentro de un mercado competitivo ha sido muy fuertemente cuestionado (ver, por ejemplo, [2]), ya que el entorno de competencia impone nuevos requisitos a los procedimientos del mercado que los modelos de optimización no cumplen. Uno de ellos es la transparencia; cualquier agente debería ser capaz de entender de forma sencilla el proceso por el que sus ofertas

son aceptadas o rechazadas y, en general, el funcionamiento del mercado. Unos mecanismos poco transparentes pueden crear, entre otros efectos, una falta de confianza en el mercado que dificulte la entrada de nuevos agentes y limite la competencia. Además, la falta de transparencia es un obstáculo muy relevante para la creación de mercados derivados y productos de cobertura del riesgo, que son una parte fundamental del buen funcionamiento de cualquier mercado. Finalmente, una crítica frecuente [2] a los modelos de optimización es que, cuando existen dos soluciones con costes totales muy similares (por ejemplo, el modelo debe escoger entre dos generadores casi iguales), la optimización no tiene criterios muy claros para determinar el resultado del mercado y puede escoger cualquiera de ellas. En el contexto tradicional esto no era un problema importante, ya que el coste total apenas varía, pero en el contexto de mercado, cada una de estas soluciones puede significar un cambio muy grande en los ingresos de los agentes individuales y no es admisible que se resuelva mediante una decisión arbitraria.

Por otra parte, el diseño de subastas es un tema ampliamente tratado por la teoría económica (ver, por ejemplo, [3] y [4]) que proporciona un conjunto de modelos de subasta con gran transparencia y que cumplen perfectamente los requisitos necesarios para operar eficazmente en un contexto de mercado. Los modelos de subastas muy simples permiten que, de forma



MODELOS DE SUBASTAS PARA MERCADOS ELÉCTRICOS

análoga a lo que ocurre en muchos otros mercados financieros (como la bolsa de valores o los mercados mayoristas de materias primas), el resultado de la subasta se determine por la libre interacción de la oferta y la demanda, sin que la influencia del modelo de casación sea apenas relevante. Sin embargo, los mercados a los que tradicionalmente se han aplicado este tipo de diseños no tienen la misma complejidad técnica que un sistema eléctrico y, por este motivo, los modelos clásicos de subastas no permiten reflejar con facilidad las características técnico-económicas de un generador de energía eléctrica. Como se describe en el apartado “El problema de la casación”, estos mecanismos presentan problemas de implantación cuando son aplicados a los mercados eléctricos.

El modelo de casación ideal debería combinar la capacidad de modelar el sistema de las herramientas de ingeniería y la transparencia de los modelos económicos. No existe en la industria eléctrica un consenso claro acerca de cómo diseñar los mecanismos de casación ni existen en la teoría de subastas desarrollos suficientes para considerar las características específicas del mercado eléctrico. En este artículo se identifica claramente cuál es la relación de la casación eléctrica con las subastas clásicas y cuáles son las carencias de los modelos teóricos actuales. Así mismo, se propone una estructura para clasificar los algoritmos existentes que puede servir de base para las futuras investigaciones acerca del diseño de los modelos de casación.

El enfoque adoptado consiste en partir de las subastas económicas clásicas más sencillas para ir complicando progresivamente el problema, añadiendo los elementos característicos de los mercados eléctricos.

Teoría económica de subastas

Las subastas han sido empleadas desde la antigüedad como un procedimiento para adjudicar de forma eficiente los recursos. Dependiendo de las características de los objetos que se quieran vender o comprar, el diseño de la subasta puede ser más o menos complicado. A continuación se repasan de forma muy breve los principales tipos de subastas, empezando por las más sencillas.

Subasta de un único bien

Las subastas más antiguas y mejor estudiadas ([3], [4]) son aquellas en las que se quiere vender un único bien entre un número elevado de compradores. El ejemplo más típico son las subastas de obras de arte, donde en cada ocasión hay un único cuadro a la venta (aunque en el mismo día tengan lugar muchas subastas consecutivas) y existen muchos compradores dispuestos a adquirirlo. Existen varios diseños alternativos. En condiciones de competencia perfecta, todos ellos consiguen que sea el comprador que más valora el objeto quien finalmente se haga con él y todos ellos

permiten al vendedor obtener el precio más elevado posible por su venta. Sin embargo, los modelos se diferencian en su comportamiento cuando el número de jugadores es limitado. Algunos de los mecanismos más populares son:

- **Subasta inglesa:** Es la típica puja en la que los agentes van haciendo ofertas con precios cada vez más altos. Los compradores van emitiendo ofertas de forma progresiva. Estas ofertas se realizan en orden ascendente de precios, empezando por precios bajos y mejorando en cada oferta los precios del comprador anterior hasta que ningún comprador puede superar el precio del último ofertante. En ese momento, éste adquiere el bien. Este es el mecanismo más empleado en las subastas de obras de arte.
- **Subasta holandesa:** El vendedor va anunciando diferentes precios en orden descendente, partiendo de un precio muy elevado que va reduciendo poco a poco. El proceso continúa mientras nadie esté dispuesto a pagar el precio que canta el vendedor y se detiene cuando el precio es suficientemente bajo como para que alguno de los compradores lo acepte, gane la subasta y compre el producto. Este método es común en las lonjas, especialmente en los mercados de pescado fresco.
- **Subasta de primer precio:** Cada uno de los comprado-

MODELOS DE SUBASTAS PARA MERCADOS ELÉCTRICOS

res puede realizar solamente una oferta, que formula al mismo tiempo que todos los demás y sin saber cómo han ofertado éstos. Por este motivo se suelen conocer como subastas de sobre cerrado. El bien se adjudica a la oferta más cara y el precio de venta es el precio de su oferta. Éste es el procedimiento común para adjudicar los bienes y servicios que compra la Administración, por ejemplo.

- **Subasta Vickrey o de segundo precio:** De la misma forma que en la subasta anterior, todos los agentes realizan una única oferta de forma simultánea (sobre cerrado). De nuevo, el ganador es el agente que hizo la oferta más cara. La diferencia con las subastas de primer precio estriba en que en este caso es la primera oferta no aceptada la que determina el precio, y no la oferta ganadora.

Subastas de múltiples unidades

El siguiente nivel de complicación en el estudio de las subastas consiste en considerar situaciones en las que se quieren vender muchas unidades de un bien homogéneo (multi-unit auctions). Éste es el caso, por ejemplo, de la subasta de Letras del Tesoro, en la que se quiere adjudicar al mismo tiempo un número elevado de estos productos financieros y en la que existe un conjunto amplio de compradores, de los cuales hay algunos que simplemente quieren comprar una Letra, pero hay

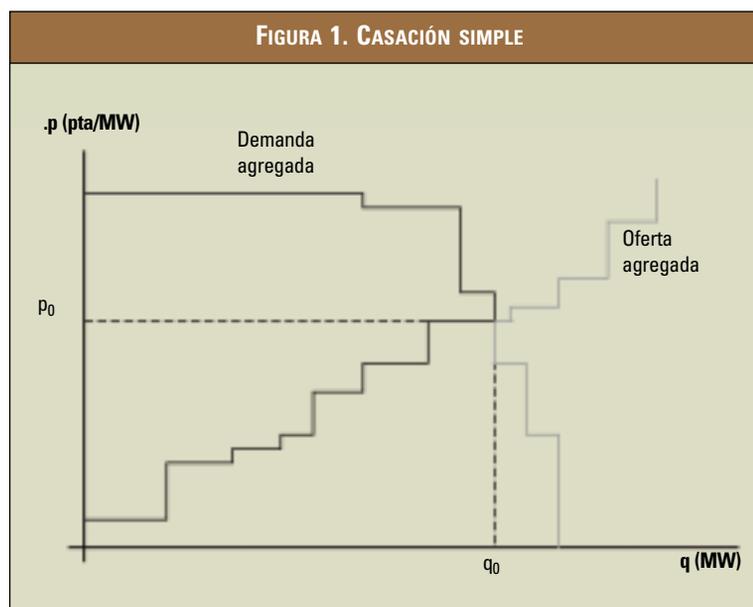
otros que pueden querer varios cientos. También es el caso del mercado eléctrico de una hora cualquiera, donde cada MW puede considerarse como una unidad diferente a vender o comprar y donde en cada hora se negocian un gran número de unidades.

Este tipo de subastas, a diferencia de las subastas de un único bien, suelen constituir juegos a dos bandas, en los que ambos lados de la transacción (comprador y vendedor) son activos y tienen capacidad para realizar ofertas y definir estrategias.

Todos las subastas diseñadas para un único bien podrían adaptarse a este nuevo entorno, pero el modelo de casación que se emplea mayoritariamente en la práctica es el que se apoya en la subasta de primer precio. En este método, los agentes vendedores del mercado envían al subastador ofertas en las que expresan la cantidad que desean

vender y el mínimo precio que están dispuestos a recibir por ello. Análogamente, los agentes compradores envían ofertas que incluyen la cantidad que desean comprar y el máximo precio que podrían pagar por ello. El modelo de subasta (ver figura 1) ordena las ofertas de venta en orden creciente de precios para formar la curva de oferta agregada y construye la curva de demanda agregada sumando las ofertas de compra en orden decreciente de precios. El punto de corte entre ambas curvas determina el resultado de la casación: la cantidad total negociada en el sistema (q_0) y el precio final resultante (p_0).

Cualquier oferta de venta a un precio inferior al precio de mercado es aceptada, así como cualquier oferta de compra con un precio superior al del mercado. Las ofertas cuyo precio sea igual al precio del mercado pueden ser parcialmente aceptadas, mientras que el resto de las



MODELOS DE SUBASTAS PARA MERCADOS ELÉCTRICOS

ofertas son siempre rechazadas. Todas las ofertas aceptadas tendrán que cobrar o pagar el precio p_0 .

Es interesante notar que cualquiera de las ofertas de venta que no han sido aceptadas tenían precios de oferta superiores al precio final del mercado, es decir, que no estaban dispuestas a vender a un precio tan bajo como el que finalmente ha resultado del mercado. Análogamente, las ofertas de compra rechazadas sólo querían comprar energía si el precio era inferior al precio P_0 que se ha obtenido de la subasta, por lo que es lógico que no hayan sido aceptadas.

Subasta con acoplamientos entre sí

Finalmente, las subastas se complican aún más cuando su objetivo consiste en vender varios productos no homogéneos cuyas valoraciones están ligadas entre sí. Supongamos, por ejemplo, que se quieren vender en una subasta 10 unidades del producto A y 10 unidades del producto B. Pero los productos están definidos de tal forma que algunos agentes tienen interés en comprar únicamente el A o el B, pero otros necesitan tener los dos al mismo tiempo para que su compra sea rentable y, si eso no es posible, no le dan ningún valor a obtener uno de los dos productos individualmente. En principio, ya que los bienes son distintos, debería realizarse una subasta diferente para cada uno de ellos. Sin embargo, los productos no pueden ser fácilmente vendidos o comprados por sepa-

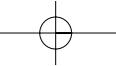
rado ya que existen condiciones que ligan los resultados de unos mercados con los resultados de otros. La cantidad de dinero que alguien está dispuesto a pagar por el producto A puede depender de en gran medida de si puede o no obtener además el producto B.

Un ejemplo de este tipo de ligaduras son las subastas por las que se han venido otorgando las concesiones del espectro de radiofrecuencias en Estados Unidos desde 1994 [5]. En este caso, las distintas bandas de frecuencia eran vendidas por separado ya que se trataba de productos claramente diferenciados con distintas características técnicas y distinta localización geográfica. Sin embargo, para crear una cadena de emisoras de radio, por ejemplo, obtener la licencia en un determinado estado podía ser muy importante si se había obtenido también emisoras en los estados limítrofes, o muy poco valioso si se había fallado en el resto de las emisoras. De igual modo, obtener una determinada banda de frecuencia era mucho más valioso si ese mismo agente conseguía también una de las dos bandas adyacentes en el espectro de frecuencias, puesto que eso le permitía emplear para transmitir datos la banda muerta que existe entre ellas para evitar interferencias. En definitiva, los resultados de algunas subastas cambian significativamente la valoración que los agentes tienen de los bienes que se venden en las otras subastas y no es posible participar en una de las subastas sin tener en cuenta los resultados de todas las demás.

El empleo de subastas para este tipo de problemas es muy reciente (el caso descrito del espectro de telecomunicaciones estadounidense fue seguramente el primer ejemplo de estas características) y, por ese motivo, no existen desarrollos teóricos completos que permitan abordar el problema de forma satisfactoria. Este documento se centra en las subastas con acoplamientos entre sí puesto que, como se describe en el siguiente apartado, los mercados de energía eléctrica presentan acoplamientos temporales que encajan perfectamente en el esquema descrito. En el apartado “El problema de la casación” se analiza en detalle la problemática que plantea esta interdependencia y se muestran los principales motivos por los que es importante tener en cuenta este efecto a la hora de diseñar el mercado. En el apartado “Modelos de casación” se describen las herramientas más importantes para construir modelos de casación con los que afrontar el problema de los acoplamientos entre productos.

El problema de la casación

El procedimiento de operación que más claramente se corresponde con el principio de transparencia es lo que se conoce como casación simple. En este método, cada hora es objeto de una casación independiente, a las que los generadores envían una o varias ofertas en las que indican el precio y la cantidad de energía que desean comprar o vender en el mercado. Se puede decir que existe un mercado dis-



MODELOS DE SUBASTAS PARA MERCADOS ELÉCTRICOS

tinto (subastas de múltiples unidades) para cada hora. La casación se realiza mediante el cruce de las curvas de oferta y demanda agregadas, (ver figura 1), y sin tener en cuenta los datos de las otras horas. Este tipo de diseño es completamente transparente; una vez conocidas las ofertas, las reglas para determinar la casación son sumamente sencillas y los resultados pueden explicarse y reproducirse sin ninguna dificultad.

Sin embargo, las condiciones reales de un generador no incluyen solamente un coste proporcional a la cantidad producida y una capacidad máxima de generación, que son los dos parámetros que se pueden reflejar en una oferta simple, sino que existe todo un conjunto de restricciones técnicas de operación [1] (límites de rampa, mínimos técnicos, tiempos máximos y mínimos de acoplamiento, limitaciones de energía, acoplamientos de cuenca hidráulica, etc.) y de partidas de costes no lineales (costes de arranque, costes de acoplamiento, etc.) que hacen que los resultados de las distintas horas dejen de ser independientes entre sí y que la estructura de costes de un grupo sea bastante más compleja que el formato de las ofertas que se le permiten hacer en la casación simple. Es decir, que existen acoplamientos muy importantes entre las subastas de cada una de las horas.

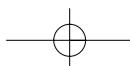
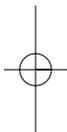
El uso de una casación simple en un mercado eléctrico implica, de algún modo, limitar el alcance del algoritmo de casación a la restricción básica de equilibrio entre generación y de-

manda y trasladar todas las demás restricciones técnico-económicas reales de los grupos, que sí aparecerían en un unit commitment clásico, a los modelos individuales de confección de ofertas de cada generador. De esta forma, los agentes que operan en un mercado de este tipo se ven en la obligación de intentar realizar un conjunto de ofertas que haga que el despacho final que resulte de la casación sea compatible con lo que el generador es capaz de realizar y que respete la estructura de costes del generador. Es decir, deben intentar internalizar todas sus particularidades técnicas y económicas dentro de las ofertas de energía que envían al modelo de casación.

Por ejemplo, el mínimo técnico es la mínima potencia a la que el generador puede producir sin que aparezcan problemas de combustión en la caldera. Si es necesario asegurar que dicho mínimo técnico va a ser respetado, el agente puede ofertarlo al mercado a un precio muy bajo de modo que se asegure que esa cantidad siempre va a entrar en el despacho. Otro ejemplo son los límites de rampas, que expresan que un generador no puede cambiar de forma demasiado brusca su nivel de producción entre una hora y la siguiente como consecuencia de la inercia de los procesos. Este tipo de limitaciones pueden hacer un generador tenga que ofertar menos potencia en una determinada hora para intentar asegurarse de que el perfil de potencias que resulta del mercado es compatible con las características de su máquina.

Por desgracia, para internalizar correctamente el mínimo técnico es preciso conocer si el generador va a estar acoplado a parado durante ese día, y para internalizar correctamente el impacto de las restricciones de rampa en la hora h , es preciso conocer el perfil de potencia en las horas adyacentes. El procedimiento de internalización no depende únicamente de los datos característicos de los equipos, sino que precisa también de un conjunto de factores como las horas de funcionamiento del grupo, el perfil de precios, la evolución de la demanda, etc. que son resultado de la propia casación y que son inciertos en el momento de realizar las ofertas. Esto hace que el proceso de formación de ofertas se dificulte notablemente y que sea preciso emplear estimaciones sobre el comportamiento del mercado para transformar los datos reales de los grupos, de formato complejo, en ofertas simples.

Si las estimaciones no son acertadas, las ofertas realizadas pueden resultar erróneas y la casación puede no ser satisfactoria para el agente. Así, es posible que a un generador se le asigne un despacho que técnicamente no es capaz de cumplir o que sea remunerado por debajo de sus costes. Por ejemplo, si un grupo repartió sus costes de arranque entre un cierto número de horas pero resulta casado un tiempo inferior al que inicialmente estimó, es posible que las ofertas que hizo no sean suficientes para recuperar completamente los costes incurridos. En estas circunstancias, puede ocurrir que la casación acepte



MODELOS DE SUBASTAS PARA MERCADOS ELÉCTRICOS

ofertas de un grupo que no habría sido despachado en un modelo de optimización centralizada o, al contrario, que un grupo que sí pertenecía al despacho óptimo que habría calculado un unit commitment no resulte casado. Dicho de otro modo, cuando se producen imprecisiones en el proceso de oferta de los agentes, es posible que el despacho que se obtiene de la casación simple no sea el despacho de mínimo coste.

Es decir, aparece un elemento de riesgo en el mercado, asociado directamente al modelo de casación escogido, que se convierte en un coste adicional para los generadores y tiene el efecto de encarecer los precios. Además, este factor de riesgo afecta con mucha mayor fuerza a los agentes de reducido tamaño, que no tienen la posibilidad de repartir la generación asignada entre distintos grupos para intentar que el despacho de todos ellos sea factible y que, en los sistemas en los que existe un cierto nivel de poder de mercado, tienen muchas más dificultades para predecir los resultados de la casación. Este riesgo se convierte así en una importante barrera de entrada que dificulta la aparición de nuevos competidores y obstaculiza la evolución del mercado hacia niveles de competencia más elevados.

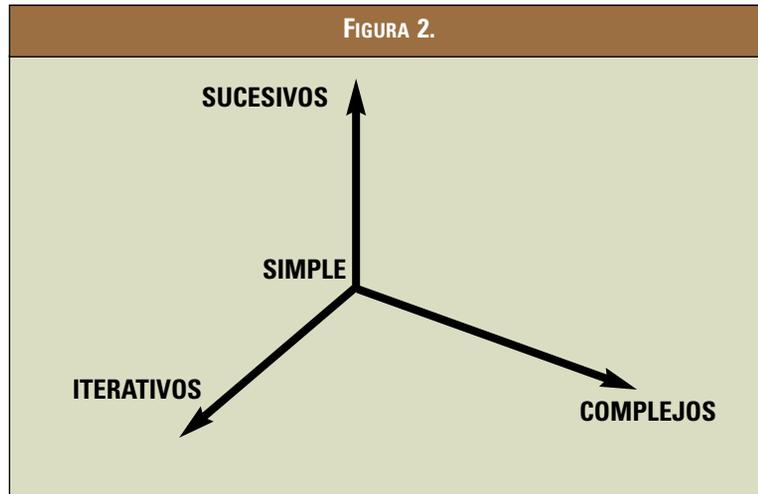
dole alguna característica adicional que permita tratar el acoplamiento entre las diferentes horas, si se quiere mitigar el riesgo que aparece en el mercado y reducir los efectos nocivos que esto entraña, especialmente las barreras de entrada. Los siguientes apartados presentan un modelo estructurado de soluciones que se han identificado como las alternativas básicas que, de forma aislada o combinadas entre sí, pueden emplearse para tratar este problema. En el Anexo A se muestra una revisión de experiencias internacionales, organizadas de acuerdo con los criterios expuestos.

internalizados en las ofertas simples de los generadores pueden ser trasladados directamente al modelo de casación para que los incluya en su método de cálculo, garantizando así que son tenidos en cuenta de manera adecuada. Al aligerar el contenido del proceso de formación de ofertas, se facilita la labor de los agentes y se disminuye la magnitud de los posibles errores que pudieran surgir del mismo. Por contra, a medida que las ofertas se van haciendo más complejas, se va perdiendo la transparencia de la casación y con ello todas las ventajas que los procesos simples tenían asociados. En el extremo, este tipo de soluciones conducen al uso de un modelo de optimización centralizado de corte tradicional.

Casación compleja

La primera solución propuesta para este tipo de problemas

En Inglaterra y Gales, antes de la actual reforma, el modelo



Modelos de casación

Puede, por tanto, ser conveniente modificar el algoritmo de casación simple, añadién-

consiste en aumentar la cantidad de información que los agentes pueden enviar al algoritmo de despacho acerca de sus características técnicas y económicas. De este modo, una parte de los datos que antes tenían que ser

utilizado para realizar la casación [6] tenía la misma estructura que los algoritmos de optimización que se empleaban antes de la liberalización del sistema. Se trata de un módulo que recibe de los agentes todos los datos

MODELOS DE SUBASTAS PARA MERCADOS ELÉCTRICOS
--

ANEXO A. EXPERIENCIA INTERNACIONAL				
	Casación simple	Mercados sucesivos	Casación iterativa	Casación compleja
PJM (Pennsylvania, New Jersey & Meryland)				Considera todas las restricciones de generación. Modela además la red de transporte y los criterios de seguridad.
Inglaterra y Gales (antes de NETA)				Considera todas las restricciones de generación, incluyendo sus costes fijos de operación.
Argentina				Modela en detalle el transporte. Las restricciones de generación se incluyen con reglas <i>ad hoc</i> .
Colombia	Semi-compleja. La casación cuenta con ofertas simples horarias.			Semi-compleja. Incluye las restricciones técnicas de producción, no los costes fijos de operación.
Australia	Los mercados con un plazo de uno o dos días son totalmente simples.	Existen mercados con uno o dos días de antelación y mercados de muy corto plazo (hasta 5 minutos)		Mercados de muy corto plazo complejos, con restricciones de generación, de red y de reserva. No considera el arranque de los grupos ni sus costes fijos de operación.
España	Semi-compleja: En todos los mercados se realizan ofertas simples de energía y se calcula el precio a partir de ellas.	El mercado diario es seguido por varios mercados intradiarios en los que realizar ajustes.		Semi-compleja. El mercado diario incluye condiciones de rampa y de ingresos mínimos. Los otros mercados tienen condiciones similares.
California (propuesta inicial) California (antes de la crisis 2000-2001)	Se emplea una casación simple. Facilitada por la existencia de agregadores de ofertas y de <i>portfolios</i> .	El mercado diario es seguido por varios mercados intradiarios en los que realizar ajustes.	Subasta iterativa propuesta por Wilson.	
NordPool (Escandinavia)	Todas las casaciones son simples	Gran número de mercados con horizontes desde varios años hasta pocos minutos. En los mercados de futuros la casación es casi continua.		

MODELOS DE SUBASTAS PARA MERCADOS ELÉCTRICOS

acerca de las restricciones técnicas y los costes de producción (variables, de arranque, etc.) y realiza un unit commitment clásico. Este modelo dio lugar a un gran número de problemas prácticos, muchos de ellos motivados porque era fácil manipularlo por parte de los agentes para elevar artificialmente los precios, y ha sido reemplazado por un enfoque mucho más simple a partir de marzo de 2001.

En España se está empleando desde el comienzo de 1998 una solución intermedia (casación semi-compleja) en la que una parte de las características de los agentes son internalizadas a través de sus ofertas simples y otra parte de las mismas son recogidas por medio de reglas complementarias. El algoritmo del mercado [7] incluye, además de otras condiciones de menor importancia, una condición de gradiente de carga, que considera explícitamente las restricciones de rampa de los grupos generadores, y una condición de ingresos mínimos, que sirve para amortiguar los errores que puedan cometerse al internalizar los

costes fijos de operación en las ofertas (la condición de ingresos mínimos retira del mercado todas las ofertas de un generador cuando el total de la remuneración que recibe por ellas no alcanza una determinada cantidad, teóricamente igual a sus costes totales de operación, pero que el propio generador decide).

En comparación con la casación simple, el modelo español sacrifica una pequeña parte de transparencia a cambio de aumentar su eficiencia. En general, los algoritmos semi-complejos pueden resultar una buena solución de compromiso para los mercados reales, equilibrando las necesidades de reducción del riesgo y los requisitos de simplicidad del modelo de casación.

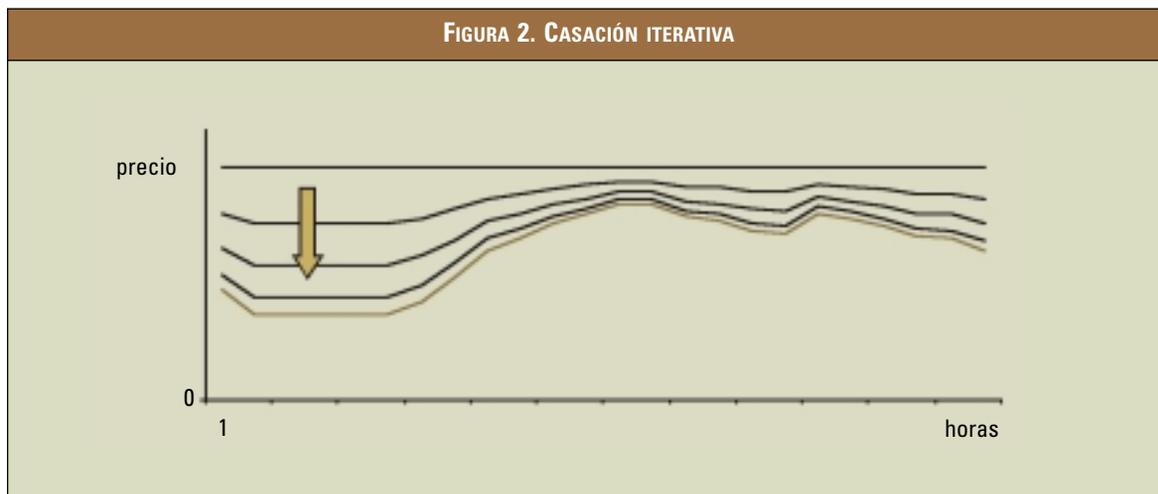
Casación iterativa

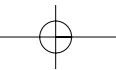
Una posibilidad alternativa, que preserva completamente la transparencia de la casación simple, consiste en proporcionar a los agentes más información sobre los resultados esperados del mercado y facilitar así el proceso de

confección de las ofertas. Al contrario que en las casaciones complejas, no se trata aquí de reducir el papel del mecanismo de internalización, sino de poner los medios para que éste pueda ser llevado a cabo con mayor precisión.

En el mercado de California, Robert Wilson propuso un procedimiento de casación iterativo [8], similar al empleado en las subastas del radioespectro anteriormente descritas. La idea básica consiste en diseñar un procedimiento progresivo en el que los participantes del mercado vayan revelando sus preferencias a lo largo de la subasta, de modo que esta información pueda ser recogida por el resto de los oferentes para mejorar sus estimaciones sobre el mercado (es decir, sobre la competencia) y sobre el resultado esperado de la casación. La información que el resto de los agentes va haciendo pública durante las etapas intermedias de la subasta facilita la internalización de las características técnico-económicas de los grupos y contribuye a que ésta se lleve a cabo de forma más eficiente. En este caso,

FIGURA 2. CASACIÓN ITERATIVA





MODELOS DE SUBASTAS PARA MERCADOS ELÉCTRICOS

el elemento clave que permite que finalmente se pueda alcanzar un resultado eficiente es el concepto de revelación de las preferencias.

A grandes rasgos, el método se puede describir como que, después de una primera casación, los agentes observan los resultados del mercado y tienen la oportunidad de modificar sus ofertas si no les satisface el despacho obtenido. De este modo, pueden corregir los posibles errores que hayan cometido al internalizar. A continuación, se casa de nuevo el mercado con las nuevas ofertas y se vuelve a dar a los agentes oportunidad de rectificar sus datos. El proceso, gobernado por unas reglas que aseguran la convergencia y que progresivamente limitan el margen de maniobra de los agentes, se detiene cuando ningún agente tiene motivos para mejorar su oferta y esa última iteración es la única relevante para determinar los resultados del mercado.

Este procedimiento pone a disposición de los agentes todos los resultados de anteriores iteraciones en el momento de realizar sus ofertas, lo que permite a los generadores estimar razonablemente los datos del mercado que son relevantes para su proceso de internalización. Se combina así la transparencia de las ofertas simples con una fuerte reducción del riesgo.

Sin embargo, estos métodos hacen que sea necesario repetir varias veces todo el proceso de oferta y requiere unos esfuerzos muy importantes en comunica-

ciones, en tiempo de proceso y en dedicación de personal altamente cualificado que no siempre son viables. En California, por ejemplo, estos procedimientos fueron finalmente descartados, debido en gran parte a las dificultades técnicas que ello suponía. A este respecto, una línea de trabajo interesante que todavía no ha sido apenas desarrollada consiste en explorar la posibilidad de usar procedimientos iterativos simplificados que requieran un menor número de iteraciones y mejoren la viabilidad del método.

Casación sucesiva

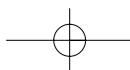
Un tercer elemento muy relevante a tener en cuenta de cara al diseño de los mecanismos de casación son los mercados sucesivos. La idea básica consiste en establecer un conjunto de mercados con diferentes horizontes temporales que se vayan sucediendo a lo largo del tiempo con un efecto telescópico o zoom y en los que los agentes puedan corregir posibles errores de internalización cometidos en los mercados de más largo plazo mediante transacciones en los mercados de más corto plazo.

La posibilidad de obtener de la casación unos resultados que no se ajusten a las características técnicas o económicas del equipo generador es menos perjudicial si se dispone de mercados posteriores en los que ir corrigiendo el despacho asignado hasta obtener un perfil de energía satisfactorio. Así, por ejemplo, si el resultado de

un primer mercado hace a un grupo producir una gran cantidad de energía en una hora h_1 y muy poca energía en la siguiente hora h_2 , incumpliendo su restricción de rampa, el generador tiene la oportunidad de acudir al siguiente mercado a comprar energía en h_1 (para reducir su producción) o a vender energía en h_2 (para generar más), hasta que finalmente consiga un despacho factible para su central.

El elemento que diferencia estas subastas sucesivas de los métodos iterativos es que aquí todas las casaciones de los mercados sucesivos son firmes, es decir, que las cantidades finales asignadas a cada agente deben calcularse como la suma de las cantidades casadas en cada uno de los diferentes mercados, y no simplemente el resultado del último mercado (como ocurría en la casación iterativa). Igualmente, los pagos o cobros totales son la suma de los pagos o cobros asociados a cada una de las transacciones realizadas.

Llevado al extremo, este enfoque conduce a una casación continua (similar a la de la Bolsa de valores, por ejemplo), a la que se pueden remitir ofertas en cualquier instante y rectificar las posiciones tomadas de un modo inmediato. Esta filosofía es, a grandes rasgos, la que se emplea en los países nórdicos [9] y constituye, sin duda, un campo muy atractivo que puede ofrecer diseños de mercado muy eficientes, transparentes y robustos. Actualmente, este tipo de mercados están teniendo un gran auge en todo el mundo, vinculados fun-



MODELOS DE SUBASTAS PARA MERCADOS ELÉCTRICOS

damentalmente al desarrollo de los mercados de largo plazo y de productos financieros de gestión de riesgos. Por otra parte, en otros sistemas como España o California, los mercados sucesivos (mercados intradiarios) se aplican en un entorno de más corto plazo, generalmente en el tiempo que transcurre entre el mercado diario y el comienzo de la operación en tiempo real.

En principio, parece que se pueden conseguir resultados muy eficientes cuando se emplean casaciones sucesivas en los mercados de largo plazo, puesto que los precios evolucionan de una forma relativamente lenta en comparación con el tiempo que necesita un agente para rectificar un problema en el proceso de internalización y, por tanto, es posible alcanzar un despacho óptimo sin

demasiada dificultad. Sin embargo, es preciso estudiar en más detalle algunas de las características de este tipo de casaciones, sus implicaciones sobre el nivel de riesgo de los agentes, las ventajas e inconvenientes de que algunos de los mercados adquieran mayor volumen de negocio que otros, las consecuencias de una posible falta de liquidez a medida que se aproxima el corto plazo, etc.

Conclusiones

Los mercados de energía eléctrica pueden caracterizarse como un conjunto de subastas de múltiples unidades donde la valoración de los diferentes productos está interrelacionada, haciendo que las su-

bastas presenten acoplamientos entre sí. Los mecanismos de casación que no consideran estos acoplamientos temporales, al hacer que el proceso de oferta de cada agente dependa de forma notable de sus estimaciones acerca del resultado de la subasta, incrementan los riesgos y los costes asociados al mercado y crean importantes barreras de entrada que pueden afectar a la evolución de la competencia en el sector. En este artículo se identifican las tres herramientas básicas disponibles actualmente para construir modelos de casación que sí tengan en cuenta el acoplamiento temporal: subastas complejas, subastas iterativas y subastas sucesivas y se describe cómo se ha abordado la cuestión en diferentes sistemas eléctricos competitivos. 

Bibliografía

- [1] G.B. Sheblé, G.N. Fahd. Unit commitment literature synopsis. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, February 1994.
- [2] R.B. Johnson, S.S. Oren, A.J. Svoboda. Equity and efficiency of unit commitment in competitive electricity markets. Utilities Policy, Vol. 6. No. 1, 1997.
- [3] P.D. Klemperer, Auction theory: A guide to the literature. Journal of Economic Surveys Vol. 13, No. 3, July 1999, pp. 227-286.
- [4] R. Burguet. Auction theory: A guided tour. Investigaciones Económicas Vol. XXIV, No. 1, 2000, pp. 3-50.
- [5] P.C. Cramton. Money out of thin air: The nationwide narrowband PCS auction. Journal of Economics & Management Strategy, 4, 267-343, 1995.
- [6] The Electricity Pool of England and Wales. An introduction to the pool rules: Issue 2.00. December 1994.
- [7] Reglas de funcionamiento del mercado de producción de energía eléctrica. B.O.E. 20 abril 2001. <http://www.omel.com>.
- [8] R. Wilson. Activity rules for an iterated double auction. en K. Chatterjee y W.F. Samuelson (eds.) "Business Applications of Game Theory". Kluwer Academic Press, 2001
- [9] R.D. Christie, I. Wangenstein. The energy market in Norway and Sweden: The spot and futures markets. IEEE Power Engineering Review, March 1998.
- [10] A. Canoyra, C. Illán, A. Landa, J.M. Moreno, J.I. Pérez-Arriaga, C. Sallé, C. Solé, The hierarchical market approach to the economic and secure operation of the Spanish power system. Bulk Power System Dynamics and Control Conference IV-Restructuring, August 1998. Santorini, Greece.