

Análisis mediante teoría de juegos de la evolución de la competencia en el sector eléctrico español

YEPES RODRÍGUEZ, R.

Universidad Nacional de Educación a Distancia.

Tel: 0034 627994219. E-mail: ryepes@cee.uned.es y ryepes@yahoo.com

RESUMEN

Se estudia la evolución de la competencia en el mercado español de electricidad, proponiendo un análisis mediante teoría de juegos. Se elabora un modelo basado en juegos dinámicos siguiendo el concepto de Equilibrio Perfecto de Markov, tomando como bloque elemental una descripción de la competencia en el mercado de producción según un enfoque tipo Cournot. Se considera la entrada de nuevos competidores. La naturaleza estocástica de los principales factores exógenos se incorpora mediante árboles binomiales. El modelo se implementa numéricamente y los resultados obtenidos incluyen la competencia y el ejercicio de poder de mercado, las pautas evolutivas de la actividad inversora, el papel de las barreras a la entrada, la eficiencia del sector en relación al comportamiento perfectamente competitivo, así como el excedente total y su distribución entre industria y consumidores

Palabras Clave: Teoría de Juegos, Equilibrio de Nash, Juegos Dinámicos, Equilibrio perfecto de Markov, Poder de mercado, Oligopolio, Mercado eléctrico, Excedentes del Mercado.

Game theoretic analysis of the evolution of competition in Spanish power sector

ABSTRACT

Evolution of competition in Spanish power market is studied through a game theoretic approach. A dynamic game model for the long term competitive dynamics is developed based on Markov Perfect Equilibrium concept using a Cournot type description of the short run competition as building block. Entry of new competitors is considered. Stochastic behavior of main exogenous factors is described by means of binomial trees. The model is numerically implemented and among the results it can be highlighted the level of competition and the degree of market power, dynamic investment patterns, the role of entry barriers, the efficiency of the sector as compared to a perfectly competitive market and total market surplus as well as its distribution between industry and consumers.

Keywords: Game Theory, Nash Equilibrium, Dynamic Games, Markov Perfect Equilibrium, Market Power, Oligopoly, Power Market, Market Surplus.

Clasificación JEL: C73, L13, L94

Artículo recibido en febrero de 2005 y aprobado en marzo de 2005.

Artículo disponible en versión Electrónica en la página www.revista-eea.net, ref.: ©-23204.

1- INTRODUCCIÓN

El sector eléctrico es de gran importancia para la economía y la preocupación por su eficiencia ha llevado recientemente a numerosos países, entre ellos a España, a organizar esta actividad en torno a mercados competitivos. Sin embargo, ante este cambio cabe hacerse las siguientes preguntas: ¿Existe un poder de mercado por el que las grandes empresas puedan alterar a su favor los resultados de la competencia?, ¿puede el mercado competitivo remunerar un desarrollo de las inversiones que permita cubrir el crecimiento de la demanda?, y en caso afirmativo, ¿cómo evolucionará la concentración industrial?, ¿se producirá la entrada de nuevos competidores? Para estudiar estas cuestiones de forma cuantitativa se propone el empleo de la teoría de juegos. Esta herramienta permite enfocar el análisis en un aspecto clave de la reestructuración del sector como es la descentralización de la toma de decisiones hacia múltiples agentes, individualistas e interrelacionados. En el sector eléctrico español la teoría de juegos se ha aplicado para analizar el equilibrio competitivo en el mercado de producción (Ocaña y Romero 1998). Sin embargo, este enfoque no se ha empleado de forma cuantitativa para estudiar la evolución de este mercado, a más largo plazo, teniendo en cuenta las decisiones de inversión de las empresas, la entrada de nuevos competidores así como el desarrollo de los factores exógenos.

1.1. Características económicas y organización del sector eléctrico

En la mayoría de los países la organización del sector eléctrico ha contado tradicionalmente con elevada participación estatal, de forma que las decisiones relacionadas con la producción y con las inversiones en nuevos activos eran el resultado de un proceso de planificación. La preocupación por la eficiencia del sector y su repercusión sobre el excedente de los consumidores han llevado a iniciar un proceso de reorganización que introduce la competencia y pasa por la separación de las actividades que integran la cadena del suministro eléctrico. La reorganización del sector eléctrico en España, mediante la Ley 54/97, pasa por la separación de estas actividades, abriendo a la competencia la generación y comercialización, mientras que el transporte y la distribución se mantienen como actividades reguladas al ser consideradas monopolios naturales.

La mejora esperada en la eficiencia surge porque, en el mercado competitivo, las empresas perciben fuertes incentivos para:

- Minimizar sus costes.
- Reducir sus precios hacia el nivel de sus costes marginales.

Los esquemas retributivos en un mercado regulado pueden fomentar uno solo de estos objetivos, pero no los dos simultáneamente. La causa de esta imposibilidad reside en la asimetría de la información existente entre la empresa y el regulador

dando lugar a una situación que la teoría de juegos describe como problema agente-principal (Tirole 1995). Así, de los principales esquemas retributivos regulados, el basado en coste de servicio y el basado en precio máximo, el primero de ellos elimina el incentivo para que las empresas minimicen sus costes, mientras que el segundo conduce a precios superiores a los costes marginales. Otros esquemas retributivos pueden lograr diferentes grados de compromiso entre ambos objetivos pero nunca un éxito simultáneo en los dos.

Por otro lado, el principal inconveniente del entorno competitivo es la posibilidad de ejercicio de poder de mercado por parte de los productores, entendido como la capacidad de éstos para desplazar a su favor el equilibrio del mercado en relación al que sería resultado de un comportamiento precio aceptante. Este problema es relevante dado que la evolución del sector eléctrico en la mayoría de los países, con grandes operadores estatales, ha conducido a industrias que, en el mejor caso, pueden considerarse oligopolios. Otro inconveniente del mercado competitivo es la incertidumbre en relación al desarrollo de la actividad inversora.

1.2. Características del sector eléctrico español

El sector eléctrico español se caracteriza por un elevado grado de concentración industrial. Según datos de Red Eléctrica de España (REE) las cuotas de mercado de las tres principales empresas en el año 2002 sumaron un 85%. La capacidad productiva del sistema eléctrico español es, por el momento, suficiente para atender su demanda. Sin embargo, este mercado cuenta con una elevada tasa de crecimiento anual (con una media del 3,8% según datos de REE), superior a la media europea y que requerirá, durante los próximos años, de una notable actividad inversora. En cuanto a la presencia de las distintas tecnologías en el sistema español es de destacar la elevada proporción de generación hidroeléctrica, haciendo que la estructura de costes marginales de esta industria esté sujeta a un factor externo, de naturaleza aleatoria, como es la pluviosidad. Existe un mercado organizado de electricidad donde se produce la casación de las ofertas de compraventa para cada periodo horario y se determina el precio de mercado del *kWh* eléctrico.

Al elaborar el modelo para describir la evolución del sector, no se considera que en los próximos años se invierta significativamente en nuevas centrales hidroeléctricas, nucleares, de carbón o fuel oil, por lo que la inversión de las empresas en el régimen ordinario se orientará hacia las centrales de generación mediante gas natural en ciclo combinado (CCGT). Esta tecnología cuenta con notables ventajas económicas y medioambientales.

De otro lado, las energías renovables están sujetas a un régimen retributivo especial, por lo que el escenario de planificación del Ministerio de Economía se considera especialmente relevante en la previsión de su desarrollo.

2. EL MODELO

Este apartado presenta el modelo basado en teoría de juegos para el estudio de la evolución dinámica de la competencia en el mercado español de electricidad. Se consideran las decisiones de producción, mediante las que las empresas maximizan sus resultados operativos en el corto plazo, y las decisiones de inversión, mediante las que maximizan el valor esperado de su negocio a largo plazo.

El modelo incluye una sucesión de periodos anuales en los que las empresas compiten en cantidades procurando maximizar sus resultados operativos, a la vez que toman decisiones de inversión con capacidad para alterar estructuralmente sus sistemas productivos. Dado el elevado periodo de retorno de estas inversiones, y teniendo en cuenta la capacidad de las decisiones presentes para alterar la estructura de la competencia en el futuro, se hace necesario en el análisis el empleo de juegos dinámicos.

2.1. Decisiones de producción

En un periodo anual $\tau : 1, 2, \dots, T$, cada una de las N empresas concurrentes elige su nivel de producción $q_i \in Q_i = [0, w_i]$ (donde w_i representa la máxima capacidad productiva de la empresa i) con el objetivo de maximizar su resultado operativo $b_i(q, k_\tau) \in \mathfrak{R}$. Siendo $q = (q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_N) \in Q = Q_1 \times Q_2 \times \dots \times Q_i \times \dots \times Q_N$ el vector de niveles de producción elegidos por todos los competidores y $k_\tau \in K_\tau$ el estado del sistema, definido por las decisiones de inversión de las empresas en los periodos previos (que determinan la estructura presente de sus sistemas productivos) y los parámetros exógenos de naturaleza estocástica, entre los que se consideran: nivel de demanda, A_τ , disponibilidad de agua para producción hidroeléctrica, Q_H , y coste de las materias primas energéticas (gas natural, carbón y fuel oil, denotados por C_{CCGT} , C_{CARB} y C_{FUEL} , respectivamente).

El resultado operativo $b_i(q, k_\tau)$, que cada empresa pretende maximizar, se expresa a su vez como:

$$b_i(q, k_\tau) = q_i \cdot p(q, k_\tau) - c_i(q_i, k_\tau) + gp_i(q, k_\tau),$$

siendo $p(q, k_\tau)$ la función inversa de demanda del mercado que en esta aplicación se considera de la forma: $p(q, k_\tau) = A_\tau - B \cdot Q$ con $Q = \sum_{i=1}^N q_i$ como cantidad agregada.

La función $c_i(q_i, k_\tau)$ representa el coste productivo, que la empresa i ha minimizado para el nivel de producción q_i , tratando la energía eléctrica obtenida mediante las diferentes tecnologías de generación como un producto homogéneo. Esto impli-

ca, para cada empresa, el empleo de las diferentes tecnologías de producción en orden creciente de sus costes marginales $cm_{i}(q_i, k_{\tau})$.

La función $gp_i(q, k_{\tau})$ representa los ingresos que obtiene la empresa i en concepto de garantía de potencia. Esta cantidad puede expresarse como $gp_i(q, k_{\tau}) = p_{gp} \cdot Q \cdot w_i/W$, donde p_{gp} es la recaudación unitaria por garantía de potencia y el cociente w_i/W es la fracción de capacidad productiva de la empresa i respecto al total del sistema, que dependerá del conjunto de decisiones de inversión tomadas por las empresas en los periodos previos a τ .

2.2. Decisiones de inversión

Al estudiar las decisiones de inversión, cada empresa tendrá en cuenta su capacidad para influir sobre la estructura de la competencia en el futuro y considerará el modo en que sus competidores pueden tratar de adaptarse. Según el concepto de estrategias de Markov, cada jugador decide, en cada etapa, en función del estado k_{τ} en que se encuentre, una acción $a_i(k_{\tau}) \in A_i(k_{\tau}) : 0, 1, \dots, \bar{a}_i$. Esta estrategia representa la elección del número de proyectos de inversión¹ que acometerá la empresa i , en el periodo τ , cuando el estado del sistema es k_{τ} . El conjunto de estrategias de los N jugadores se denota a su vez por:

$$a(k_{\tau}) = (a_1(k_{\tau}), a_2(k_{\tau}), \dots, a_N(k_{\tau})) \in A(k_{\tau}) = A_1(k_{\tau}) \times A_2(k_{\tau}) \dots \times A_N(k_{\tau}).$$

En cada estado, mediante su decisión estratégica, cada empresa tratará de maximizar el valor esperado de su negocio, entendido como la suma descontada de los resultados operativos obtenidos a lo largo de los periodos siguientes. Para el estado inicial k_0 , este valor esperado puede expresarse, para la empresa i , como:

$$v_i(a, k_0) = \sum_{\tau=0}^T \delta^{\tau} \cdot \sum_{k_{\tau} \in K_{\tau}} p(k_{\tau} | a, k_0) \cdot (b_i(q, k_{\tau}) - I_i(k_{\tau})),$$

donde δ representa un factor de descuento para los pagos futuros, el coste anual de las inversiones que soporta la empresa i en el estado k_{τ} se denota por $I_i(k_{\tau})$, mientras que $p(k_{\tau} | a, k_0)$ es la probabilidad de alcanzar el estado k_{τ} en la etapa τ , caso de haberse comportado los jugadores según el conjunto estratégico partiendo del estado inicial k_0 .

1. Según se expone en el apartado 3.1, se considera la construcción de centrales estándar de generación de 400 MW de capacidad mediante tecnología CCGT. Esto permite representar las acciones a_i mediante números enteros.

Se emplea una definición recursiva para estas funciones de pago, siguiendo la formulación de la programación dinámica y garantizando así que la solución obtenida representa un equilibrio perfecto en subjuegos.

$$v_i(a, k_\tau) = b_i(q, k_\tau) - I_i(k_\tau) + \delta \cdot \sum_{k_{\tau+1} \in K_{\tau+1}} tr(k_{\tau+1} | a, k_\tau) \cdot v_i(a, k_{\tau+1}),$$

donde $tr(k_{\tau+1} | a, k_\tau)$ representa la probabilidad de que se produzca la transición del sistema al estado $k_{\tau+1}$ cuando se encuentra en el estado k_τ y los jugadores se comportan según el conjunto de estrategias \mathbf{a} .

Esto implica para los jugadores aplicar el principio de optimalidad de Bellman (Bellman 1954), según el cual, las acciones elegidas en cada momento deben ser óptimas desde el estado en el que se encuentren en adelante y sin tener en cuenta la historia de sucesos pasados que ha conducido al sistema a dicho estado.

Debido a la concentración industrial existente en los sectores eléctricos es habitual encontrar que con las grandes compañías coexiste un conjunto de empresas de menor tamaño. Con objeto de facilitar el análisis numérico es frecuente, en el estudio de la competencia, agrupar estas empresas de menor tamaño en un único jugador, para el que se supone un comportamiento precio aceptante (Borenstein y col. 1999). Este jugador, denominado en la literatura inglesa *competitive fringe*, tiene un comportamiento no estratégico por su escasa capacidad de influir en el conjunto del mercado. Al elegir su nivel de producción, este jugador considera despreciable el término $q_i \cdot p'(q, k_\tau)$ que surge de la condición de primer orden en su problema de optimización individual. En cuanto a sus decisiones de inversión, este jugador de comportamiento no estratégico agrupa también a los nuevos competidores que entran en el mercado. Las empresas del sector toman sus decisiones de inversión para maximizar el valor esperado del conjunto de su negocio $v_i(a, k_\tau)$, mientras que las empresas entrantes, al no tener intereses previos en el mercado, decidirán invertir siempre que con ello superen un cierto umbral de rentabilidad esperada. Por este motivo, el criterio de decisión para las inversiones del grupo de empresas no estratégicas será la maximización del volumen de inversión $a_i(k_\tau)$ sujeto a $v_i(a, k_\tau) > 0$. En este caso, debe tenerse en cuenta que los pagos por etapa $b_i(q, k_\tau)$ relevantes para el cálculo del valor a largo plazo $v_i(a, k_\tau)$ son únicamente los correspondientes a los nuevos proyectos. Por tanto, a efectos únicamente del cálculo de $v_i(a, k_\tau)$ para las empresas entrantes, la cantidad q_i que interviene en los beneficios por etapa $b_i(q, k_\tau)$ es solo aquella producida mediante los nuevos proyectos.

2.3. Concepto de equilibrio

Se adopta el enfoque de los juegos no cooperativos en el que los jugadores eligen estrategias óptimas tomando como dadas las estrategias del resto de participantes, según una toma de decisiones independiente. No se considera un enfoque cooperativo en el que los jugadores elegirían sus estrategias de forma conjunta. En los mercados organizados para la compraventa de electricidad las conductas colusivas no están permitidas y son objeto de supervisión por parte de las autoridades reguladoras. A largo plazo, en lo referido a las estrategias de inversión, puede resultar difícil para las empresas del sector sustentar acuerdos cooperativos cuando existe la posibilidad de entrada de nuevos competidores que, al no tener intereses previos en el sector, no estarán incentivados a respetar dichos acuerdos. Por otra parte, al tratarse de sistemas con más de dos jugadores, existe la posibilidad de formación de coaliciones, lo que complicaría adicionalmente el enfoque cooperativo al no destacar un concepto de solución unánimemente aceptado para su análisis.

Como solución en el juego no cooperativo se emplea el equilibrio de Nash. Esto implica encontrar un conjunto coherente de estrategias en el que la opción elegida por cada jugador es una respuesta óptima a las decisiones de los demás, y ninguno de ellos decidiría desviarse unilateralmente del equilibrio, puesto que esto redundaría en su perjuicio (Doblado y otros 2003).

En el caso de las decisiones de producción, el equilibrio de Nash en el estado k_τ sería aquel conjunto estratégico q^* en el que, para todo jugador i y toda estrategia q_i , se cumpliese:

$$b_i(q^* \setminus q_i, k_\tau) \geq b_i(q_i, k_\tau),$$

donde $q^* \setminus q_i$ representa el conjunto de estrategias resultante de elegir q_i el jugador i , mientras que el resto de jugadores se está comportando según q^* .

Análogamente, el equilibrio de Nash para las decisiones de inversión o, en la terminología de los juegos dinámicos, equilibrio perfecto de Markov (*Markov Perfect Equilibrium*, MPE), equilibrio en retroalimentación (*feedback*) o equilibrio en lazo cerrado sin memoria, vendría dado por un conjunto de estrategias $a^*(k_\tau)$ en el que, para todo jugador i , todo estado k_τ y toda estrategia $a_i(k_\tau)$ se cumpliese:

$$v_i(a^* \setminus a_i, k_\tau) \geq v_i(a_i, k_\tau).$$

Mediante este enfoque, el equilibrio obtenido será perfecto en subjuegos (entendiendo como un mismo subjuego todos aquellos que parten de un mismo estado k_τ) y no aparecerán estrategias basadas en amenazas no creíbles.

2.4. Elección del modelo para describir la competencia en el corto plazo

Existen numerosos modelos basados en teoría de juegos para describir la competencia de forma cuantitativa. El modelo aquí presentado se basa en un análisis tipo

Cournot, en el que las empresas compiten en cantidades. Como segundo enfoque alternativo, el modelo de Bertrand considera que la competencia se describe mejor mediante la elección de precios. Sin embargo, el modelo de Bertrand conduce al resultado paradójico de que cualquier oligopolio, incluso el duopolio, tendría un comportamiento precio aceptante, aunque este resultado puede superarse introduciendo restricciones en las capacidades de producción de las empresas (dando lugar a un tipo de modelos caracterizados por la multiplicidad de equilibrios de Nash) o mediante una estructura secuencial de decisiones en varias etapas.

En tercer lugar, aparecen los modelos basados en el equilibrio en funciones de oferta (Klemperer y Meyer 1989). En este caso, las empresas especificarían las cantidades que están dispuestas a producir para cada posible nivel de precios. Presentan la ventaja de aproximar la variable estratégica al modo en que las empresas intervienen en los mercados organizados (donde se ofertan tanto cantidades como precios), pero cuentan con el inconveniente de conducir a una infinidad de equilibrios de Nash distribuidos entre el resultado de Cournot, como extremo menos competitivo, y el resultado de Bertrand, como extremo más competitivo. Esta multiplicidad impide emplear este enfoque para realizar predicciones del resultado de la competencia sin recurrir al empleo de restricciones, las cuales pueden también distorsionar el problema.

El enfoque más reciente corresponde a los modelos de subastas basados en funciones de oferta escalonadas (von der Fehr y Harbord 1993). En este caso, cada empresa especifica los pares discretos de cantidades y precios que está en disposición de producir, tal y como ocurre en los mercados organizados. Estos modelos resultan de utilidad, por tanto, en el estudio de las reglas de las subastas que forman estos mercados. Sin embargo, al estar basados también en funciones de oferta, presentan los mismos inconvenientes en relación a la multiplicidad de equilibrios.

El modelo propuesto emplea un análisis tipo Cournot en el que se describe la competencia en el mercado de producción durante el periodo anual. Las cantidades elegidas por las empresas representan su predisposición a competir durante cada año, mientras que no se describe de forma explícita el modo en que intervienen en las subastas del mercado organizado a más corto plazo, lo cual, además de contar con las dificultades teóricas citadas anteriormente, requeriría un elevado volumen de cálculo numérico que impediría extender el horizonte del análisis hasta el periodo requerido para estudiar las decisiones de inversión.

A pesar de los matices que diferencian este estudio del clásico modelo de Cournot, tales como la discontinuidad de las funciones de costes marginales o la presencia de un jugador de comportamiento precio aceptante, las correspondencias de mejor respuesta son funciones continuas, no crecientes y con pendientes comprendidas en el intervalo $[-1,0]$, pudiendo demostrarse que el equilibrio de Nash existe y además es único, proponiéndose un algoritmo de cálculo numérico, mediante la aplicación iterada

de las funciones de mejor respuesta, para el que la convergencia al equilibrio está garantizada (Friedman 1977).

2.5. Elección del modelo para describir la competencia en el largo plazo

La elaboración del modelo que describe la evolución de la competencia a largo plazo, teniendo en cuenta las decisiones de inversión, requiere el empleo de juegos dinámicos.

El concepto de solución más riguroso para juegos dinámicos corresponde a las estrategias en lazo cerrado (*closed-loop*), o estrategias de memoria perfecta, en las que los jugadores adaptan sus acciones a lo largo del juego incorporando, de forma óptima, toda la información que se va revelando durante el mismo. Sin embargo, este enfoque presenta dificultades de tipo teórico, al dar lugar a múltiples equilibrios de Nash,² y de tipo práctico, al requerir un gran volumen de cálculo numérico. Estos inconvenientes han impulsado el desarrollo de conceptos de solución simplificados, que pueden agruparse en tres enfoques: estrategias en lazo abierto (*open-loop*), estrategias en lazo abierto S-adaptadas (*S-adapted*) y estrategias de Markov o en retroalimentación (*feedback*).

Las estrategias en lazo abierto (*open-loop*) consideran que cada jugador elige un curso de acciones antes del comienzo del juego, que ejecuta independientemente de la información que se pueda ir revelando durante el mismo.

Las estrategias en lazo abierto S-adaptadas (*S-adapted*) (Haurie y col. 1990) consideran que cada jugador elige un curso de acciones que podrá adaptar a lo largo del juego, teniendo en cuenta el desarrollo de los factores exógenos de naturaleza estocástica pero sin considerar las decisiones tomadas por el resto de jugadores.

Las estrategias de Markov (Fudenberg y Tirole 1991), estrategias en retroalimentación (*feedback*) o estrategias en lazo cerrado sin memoria, enfoque que aquí se adopta, consideran que los jugadores eligen un curso de acciones que adaptarán, a lo largo del juego, teniendo en cuenta la información que se pueda revelar sobre los sucesos externos y sobre las acciones de sus competidores, pero solo en la medida en que estos influyan en el estado actual del sistema, y sin tener en cuenta la historia precisa de sucesos que ha conducido al sistema a dicho estado. Se incluyen en el estado del sistema aquellas variables que resultan relevantes en la determinación de los pagos.

2. Esta multiplicidad de equilibrios está relacionada también con la posibilidad de acuerdos cooperativos soportados mediante estrategias basadas en la reciprocidad. Así, al igual que los juegos repetidos pueden contar con infinidad de resultados cooperativos sustentados sobre la amenaza de comportarse según el equilibrio de Nash del juego en una etapa, el juego dinámico con estrategias en lazo cerrado cuenta con infinidad de resultados cooperativos sustentados sobre la amenaza de comportarse según el equilibrio no cooperativo dado por las estrategias de Markov.

Las estrategias en lazo abierto y S-adaptadas, al no tener en cuenta toda la riqueza de la interacción estratégica de los jugadores participantes, pueden dar lugar a inconsistencias temporales en las que un jugador puede encontrar preferible, durante el curso del juego, desviarse de la estrategia inicialmente concebida como óptima.

Los enfoques de solución simplificados de estrategias S-adaptadas y estrategias de Markov siguen siendo equilibrios de Nash en juegos en los que se permita a los jugadores adoptar estrategias que incorporen información más detallada.

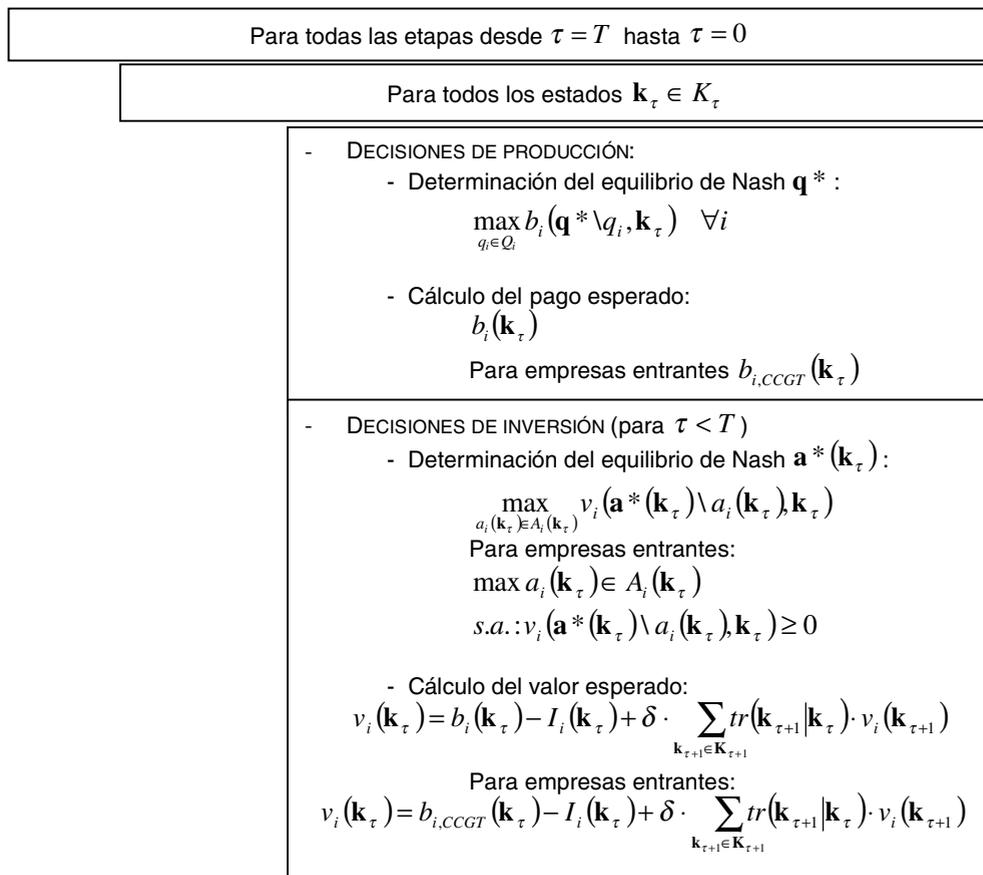
En el modelo propuesto, las decisiones de producción y de inversión se tratan de forma independiente salvo por el efecto mutuo de unas sobre las funciones de pago de las otras. Según esto, los jugadores no condicionan sus decisiones de inversión a las acciones tomadas en el mercado de producción, salvo en la formación de expectativas sobre sus flujos de caja futuros y, en sentido contrario, tampoco condicionan sus decisiones de producción al desarrollo de las inversiones salvo por el efecto que estas tienen sobre el estado del sistema k_τ .

El enfoque de las estrategias de Markov representa el concepto de solución más riguroso compatible con la capacidad de cálculo de los ordenadores personales actuales y que mitiga las dificultades relacionadas con la multiplicidad de equilibrios de Nash (Benkard 2004, Vives 1999).

2.6. Algoritmo numérico

Para la solución numérica, siguiendo el enfoque de inducción hacia atrás, se propone el siguiente algoritmo: Comenzando en la penúltima etapa, se calcula el equilibrio de Nash en estrategias de inversión para cada uno de los posibles estados del sistema. A su vez, el cálculo del valor $v_i(a, k_\tau)$ para el juego de competencia en el largo plazo requiere hallar los correspondientes equilibrios de Nash en estrategias de producción que determinan los pagos $b_i(q, k_\tau)$ de cada etapa. Para las estrategias de producción, se determina el único equilibrio en cada estado $k_\tau \in K_\tau$ mediante la aplicación iterativa, jugador a jugador, de las correspondencias de mejor respuesta. Respecto a las estrategias de inversión, al representarse mediante números enteros, el equilibrio de Nash en cada estado se determina por inspección numérica. Como test para la unicidad del equilibrio se realizan ensayos numéricos alterando la rutina de búsqueda así como truncando el juego en diferentes horizontes temporales no encontrándose equilibrios diferentes a los presentados.

Una vez determinadas las estrategias que forman los equilibrios de Nash en cada uno de los posibles estados de la penúltima etapa, el algoritmo numérico puede retroceder una etapa según el esquema que se presenta en la figura 1.

Figura 1. Esquema de cálculo numérico del Equilibrio Perfecto de Markov

El número de estados que puede alcanzar el sistema en las últimas etapas puede ser muy elevado. Esta dificultad, denominada *curse of dimensionality*, relacionada con la gran dimensión numérica que adquieren estos problemas, está presente en la mayor parte de los modelos de programación dinámica y restringe notablemente su aplicación (Vedenov 2001).³

Las características del modelo permiten acotar el volumen de cálculo numérico requerido en unos límites que hacen posible su implementación dentro de la capacidad de los ordenadores personales actuales. La agrupación de las empresas de menor

3. A modo de ejemplo, un sistema con 4 jugadores (cuyos sistemas productivos pudiesen alcanzar 10 estados distintos en la última etapa) con 5 factores exógenos de naturaleza estocástica (que en la última etapa pudiesen localizarse en 5 posibles estados) daría lugar a $10^4 5^5 = 31,25 \cdot 10^6$ estados para los que calcular los correspondientes equilibrios de Nash en estrategias de producción e inversión.

tamaño en un solo agente de comportamiento precio aceptante limita el número de jugadores. La existencia de una tecnología predominante en la que puede esperarse estén basadas la mayor parte de las inversiones en el régimen ordinario durante los próximos años, en forma de centrales de tamaño estándar, permite representar las estrategias de inversión mediante números enteros y limitar el número de estados del sistema.

3. ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO

Este apartado expone la determinación de los parámetros necesarios para la implementación del modelo. En el sector eléctrico existe un razonable grado de transparencia que permite realizar las estimaciones a partir de fuentes públicas de información. En primer lugar, se presentan los parámetros relacionados con las características de los jugadores. En segundo lugar, se expone la estimación de la función de demanda y, en tercer lugar, la caracterización de los factores exógenos de naturaleza estocástica.

3.1. Características de los jugadores

El modelo considera cuatro jugadores. Los tres primeros corresponden a las principales empresas del sector eléctrico español: Endesa, Iberdrola y Unión Fenosa. El cuarto jugador agruparía al resto de empresas con menos peso estratégico así como los nuevos operadores que entrasen en el mercado.

En cuanto a las características de los sistemas productivos se consideran las distintas tecnologías del régimen ordinario: Hidroeléctrica, nuclear, carbón, fuel oil, mixta de fuel oil y gas así como CCGT. Se ha supuesto que todas las centrales pueden clasificarse en uno de estos seis grupos, y que todas las de un grupo se caracterizan por los mismos costes marginales constantes. Por tanto, los sistemas productivos de las empresas se pueden definir sin más que especificar su capacidad productiva de cada una de las tecnologías. Podría añadirse más detalle en la descripción de los sistemas productivos, disponiendo de los datos necesarios, sin que implicase una excesiva carga para la solución numérica del problema.

Las capacidades de producción de las centrales pertenecientes a cada empresa se estiman a partir de la información de los Informes de Operación del Sistema Eléctrico publicados anualmente por REE (Red Eléctrica de España, S.A.) (REE 2002). La capacidad de generación hidroeléctrica se describe teniendo en cuenta un factor exógeno de naturaleza estocástica como es la pluviosidad, según se expone en párrafos posteriores.

Los costes marginales para las distintas tecnologías se consideran constantes y compuestos por dos sumandos: (1) Costes variables de operación y mantenimiento,

estimados a partir de los datos publicados por REE en los Informes de Operación del Sistema Eléctrico de los años 1995, 1996 y 1997, suponiendo implícitamente que, desde entonces, las mejoras en la eficiencia han compensado el aumento por inflación. (2) Costes de combustible (salvo en hidroeléctrica y nuclear), principal componente del coste marginal y cuya naturaleza estocástica, según se expone en párrafos posteriores, se describe a partir de los costes históricos de importación en España de las distintas materias primas energéticas según publica la Agencia Internacional de la Energía (IEA) (IEA 2002). En el caso del carbón, esta metodología implica suponer que las ayudas a la producción de carbón nacional hacen que las compañías eléctricas resulten indiferentes entre consumir carbón nacional o importado.

La retribución por garantía de potencia se calcula mediante las cuotas de reparto w_i/W vigentes en 2002 según publica Omel (Compañía Operadora del Mercado Español de Electricidad, S.A.) adaptándose, en los sucesivos periodos anuales, según las inversiones efectuadas por las empresas. El pago unitario p_{gp} es fijado mediante Real Decreto, siendo su valor en 2002 de 0,4808 cEUR/kWh. Se estudia también la sensibilidad de los resultados a la variación de este parámetro.

Se considera que el mecanismo de retribución de los costes de transición a la competencia (CTCs)⁴ no influye en las estrategias productivas de las empresas. La Ley 54/97 reconoce un montante total de CTCs y para garantizar que las empresas recuperan la cantidad exacta, los pagos que reciben por este concepto deberían ajustarse teniendo en cuenta los ingresos obtenidos a través del mercado. Esto condujo, durante los primeros años de funcionamiento del mercado organizado, a que la recuperación de los CTCs influyese en la conducta productiva de las empresas (Fabra 2004). Sin embargo, posteriores modificaciones en el mecanismo de recuperación de los CTCs hacen que la relación entre los ingresos percibidos a través del mercado y la recuperación de los CTCs no sea inmediata.

En cuanto a los proyectos de inversión, se consideran unidades de generación CCGT estándar de 400 MW de capacidad, con un coste de inversión de 200 MEUR y una vida útil de 20 años. Debido a que el horizonte de estudio del modelo no alcanza 20 años, el coste de las inversiones se incluye mediante un pago anualizado con un coste de capital del 5% para las principales empresas (tres primeros jugadores) y 12% para el grupo de empresas con menos peso estratégico así como empresas entrantes. Posteriormente, al estudiar las barreras a la entrada, se modifica esta hipótesis para evaluar el efecto de la desventaja en coste de las empresas entrantes. Además de los costes fijos, que retribuyen el capital inmovilizado, se tiene en cuenta, en la determinación de los pagos, la tasa impositiva del 35% aplicada a la parte de los beneficios generada por estos nuevos proyectos.

4. Costes incurridos por las compañías bajo el anterior marco regulador y cuya recuperación, en el nuevo mercado competitivo, no está garantizada.

En el modelo propuesto se han incluido, en la definición de los pagos, aquellos elementos que resultan relevantes para el estudio de las decisiones de producción e inversión. Sin embargo, hubiese sido posible ampliar la definición de los pagos del juego para que sirviesen como estimación más completa del beneficio o el flujo de caja de las empresas. De esta manera, el modelo basado en teoría de juegos podría emplearse también como herramienta en la valoración de empresas. Así, del mismo modo que los modelos basados en opciones reales permiten incorporar la toma de decisiones contingente a la valoración de inversiones o empresas, los modelos basados en teoría de juegos permiten incorporar a la valoración la interacción estratégica entre los distintos agentes participantes. El modelo puede adaptarse para incluir también restricciones de naturaleza medioambiental así como un posible coste de los derechos de emisión, los cuales, al ser requeridos en distinta cuantía por las diferentes tecnologías, podrían influir en las estrategias resultantes.

3.2. Demanda del mercado

En cuanto a las dimensiones del mercado, se considera, en primer lugar, el sector eléctrico en España. Parece razonable estimar como nulo el efecto de la competencia en mercados eléctricos de países adyacentes, dado el bajo volumen del balance de energía eléctrica que, por el momento, representan los intercambios internacionales. En segundo lugar, el modelo se centra en la producción bajo el régimen ordinario. Esto no implica que se omita el desarrollo de las energías renovables y del resto de tecnologías que componen el régimen especial, que por otro lado representan una fracción muy significativa del mercado, sino que no se espera de estos productores una participación estratégica en el mercado. Esto implica una hipótesis de comportamiento precio aceptante para la producción en régimen especial. En cuanto a las inversiones en estas tecnologías, se consideran más relacionadas con las políticas de ayuda que las favorecen que con la estrategia e iniciativa empresarial, y su descripción no requeriría incluirse en el modelo basado en teoría de juegos.

La conducta de los consumidores se representa mediante una función de demanda lineal. La aplicación de este tipo de modelos al sector eléctrico cuenta con la dificultad de estimar la elasticidad de la demanda al precio. Esto es debido a que no existen estimaciones precisas para la elasticidad en periodos anuales y, si se empleasen los bajos valores que resultan para la elasticidad a más corto plazo, se obtendrían resultados poco realistas. Para resolver esta dificultad, según la metodología que ha sido propuesta (Stoft 2002), la función de demanda se ajusta a los datos disponibles para el año 2002. La cantidad y el precio medio ponderado del mercado determinan un punto en dicha función, mientras que la pendiente se ajusta de forma que el modelo de la competencia describa, en lo posible, los resultados del mercado. La pendiente estimada de este modo se considera constante en los años sucesivos.

Mediante el procedimiento anterior, se determina la función de demanda para el año 2002 y, en los años sucesivos, su ordenada irá creciendo según un proceso estocástico. Dicho proceso estocástico describe la demanda total peninsular, mientras que la demanda del régimen ordinario se calcula restando la producción del régimen especial y las importaciones, dadas por el escenario de planificación del Ministerio de Economía (Ministerio de Economía 2002). La evolución de la demanda total peninsular según datos de REE se representa mediante un árbol binomial (Cox y Ross 1976), proceso estocástico discreto en el que se asigna al final de cada etapa un 50% de probabilidad a dos posibles transiciones, cuyos rendimientos (que resultan $r_u = 1,057$ y $r_d = 1,019$) se determinan de forma que su valor esperado y varianza en el árbol binomial sean representativos del proceso estocástico descrito ($\mu_r = 1,038$ y $\sigma_r = 0,019$). La figura 2 (más adelante) muestra este árbol binomial.

3.3. Factores exógenos de naturaleza estocástica

Los factores exógenos de naturaleza estocástica incluidos en el modelo son: el crecimiento del nivel de demanda, los precios de las materias primas energéticas (gas natural, fuel oil y carbón) y la disponibilidad de agua para producción hidroeléctrica. Según se expone en el párrafo anterior, el crecimiento del nivel de demanda se describe mediante un árbol binomial. Análogamente, la evolución del coste del gas natural se representa mediante un árbol binomial. Los rendimientos alto y bajo para este factor se estiman en $r_u = 1,0907$ y $r_d = 0,8397$, respectivamente, a partir de los datos de coste del gas natural según publica la Agencia Internacional de la Energía.

Según se expone en el apartado 2.6, al incrementar el número de estados por los que puede pasar el sistema, el volumen de cálculo numérico requerido podría exceder la capacidad de cálculo de los ordenadores personales actuales. Por este motivo, el empleo de árboles binomiales se limita a la descripción de la demanda y del coste del gas natural, teniéndose así en cuenta una gran variedad de trayectorias (como muestra la figura 2) sin incrementar excesivamente el número de estados por los que puede pasar el sistema. Para fuel oil, carbón y disponibilidad de recursos hídricos se consideran distribuciones para sus valores en cada periodo que son independientes de sus valores en periodos previos, según las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} C_{FUEL} &= A_{FO-GN} + B_{FO-GN} \cdot C_{CCGT} + N^{-1}(\mu_{FUEL-FUEL^*}, \sigma_{FUEL-FUEL^*}, z_1) \\ C_{CARB} &= N^{-1}(\mu_{CARB}, \sigma_{CARB}, z_2) \\ Q_H^* &= N^{-1}(\mu_{QH^*}, \sigma_{QH^*}, z_3) \end{aligned}$$

Para el coste del fuel oil se considera la correlación existente con el coste del gas natural según una recta de regresión elaborada a partir de los datos publicados por la

Agencia Internacional de la Energía. Se tiene en cuenta la desviación del precio del fuel oil respecto a dicha regresión según la distribución normal de los errores. Se obtiene: $C_{FUEL*} = 1,588 \cdot C_{CCGT} - 0.1557$ cEUR/kWh, junto con un error que se distribuye con media cero y desviación típica $\sigma_{FUEL-FUEL*} = 0,956$ cEUR/kWh.

Para el coste del carbón se considera una función de distribución normal de media $\mu_{CARB} = 1,68$ cEUR/kWh y desviación típica $\sigma_{CARB} = 0,22$ cEUR/kWh elaborada a partir de datos de la Agencia Internacional de la Energía.

La disponibilidad de recursos hídricos se describe estableciendo una relación entre la potencia instalada (W_H), la energía hidroeléctrica producible (Q_H^*),⁵ y la finalmente producida (Q_H). A partir de los datos anuales publicados por REE desde 1940 se estima la relación $Q_H = 7,45 \cdot 10^{-2} \cdot (W_H \cdot Q_H^*)$ GWh, mientras que la energía hidroeléctrica producible, Q_H^* , se representa a su vez mediante una distribución normal de media $\mu_{QH*} = 29,3 \cdot 10^3$ GWh y desviación típica $\sigma_{QH*} = 7,88 \cdot 10^3$ GWh.

En la implementación numérica del juego se considera un número discreto de estados para cada uno de estos factores (coste de fuel oil, carbón y disponibilidad de agua). Concretamente, se eligen tres valores para cada uno de ellos: un escenario central, al que se asigna una probabilidad del 40% coincidiendo con los valores esperados así como escenarios alto y bajo, a los que se asignan probabilidades de 30%, calculados como el valor esperado para las correspondientes colas de las distribuciones. Estos valores se recogen en la tabla 1.

Tabla 1. Valores representativos para los factores exógenos

ESCENARIO	PROBABILIDAD	DISPONIBILIDAD RECURSOS HÍDRICOS (Q_H^*) (10^3 GWh)	COSTE CARBÓN (C_{CARB}) (cEUR/kWh)	COSTE FUEL-OIL ($C_{FUEL} - C_{FUEL}^*$) (cEUR/kWh)
BAJO	0,3	20,122	1,429	-1,108
CENTRAL	0,4	29,252	1,684	0
ALTO	0,3	38,382	1,939	1,108

Con objeto de validar esta representación simplificada, se ha comparado el valor esperado del pago de los jugadores en el juego en una etapa, $b_i(q, k_\tau)$ (calculado a partir de tres escenarios para cada una de estos factores) con aquel que resultaría de

5. Máxima cantidad de energía eléctrica que se podría producir considerando las aportaciones hidráulicas registradas durante el año y una vez deducidos los consumos de agua realizados para riego o para otros usos distintos de la producción de energía eléctrica.

considerar las funciones de distribución completas (calculando el valor esperado mediante simulación de Montecarlo para 10000 escenarios anuales).

4. RESULTADOS

El modelo propuesto conduce a un gran volumen de resultados al describir la evolución de la competencia en el sector ante cada uno de los posibles desarrollos de los factores exógenos. Por este motivo, el análisis de los resultados se centra en un número limitado de escenarios que permita poner de manifiesto las características más relevantes del problema estudiado. Se consideran nueve escenarios, correspondientes a tres desarrollos para el crecimiento de la demanda por otros tres para la evolución del coste del gas natural, que se representan en la figura 2 en los correspondientes árboles binomiales. En cada uno de estos escenarios, las soluciones del equilibrio perfecto de Markov determinan las estrategias de inversión de las empresas, mientras que los equilibrios de Nash en el juego de competencia en el corto plazo determinan las estrategias de producción en cada periodo anual. Se calculan, en cada etapa, las principales variables del sector, considerando la demanda y el coste del gas natural según sus correspondientes árboles binomiales y calculando el valor esperado para los 27 escenarios que resultan de combinar los tres valores para coste del carbón, fuel oil y disponibilidad de agua.

Se estudia la evolución de las estrategias de las empresas (cantidad producida y decisiones de inversión), beneficios por etapa, cantidad y precio de mercado, excedente total del sector así como su distribución entre industria y consumidores.⁶ Los resultados del mercado oligopolista se comparan con aquellos que podrían esperarse en un entorno de competencia perfecta en el que todas las empresas se comportasen como precio aceptantes, obteniendo así una medida de eficiencia del sector. Se calculan también en cada etapa, como índices de concentración industrial habituales en este sector, el índice de Herfindahl-Hirschman, HHI , y el índice de Lerner, L_x .⁷

6. Los excedentes del mercado así como su distribución entre industria y consumidores se calculan según:

$$Ex_{Tot} = Ex_{Ind} + Ex_{Con}$$

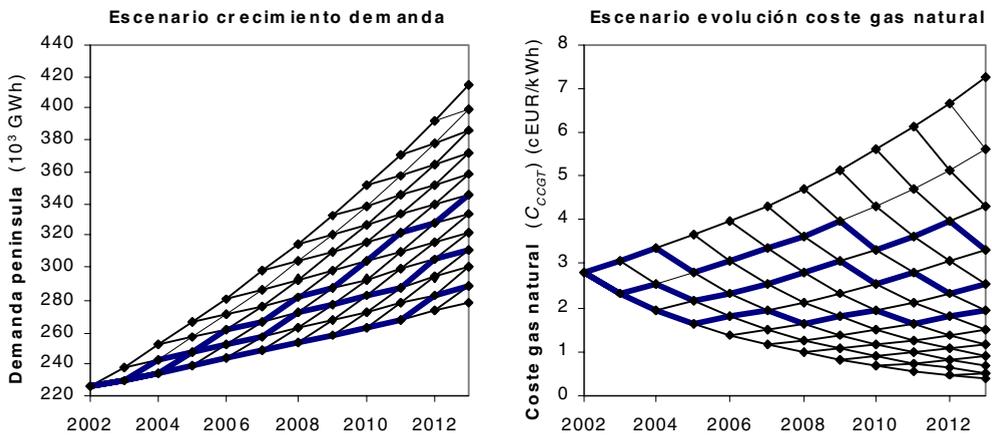
$$Ex_{Ind} = \sum_{i=1}^N b_i(q, k_\tau) \quad y \quad Ex_{Con} = \int_{q=0}^{q=Q} (p(q) - p(Q)) dq$$

7. Los índices HHI y L_x se calculan, en cada periodo anual, según:

$$HHI = \sum_{i=1}^N \left(\frac{q_i}{Q} \right)^2 \quad y \quad L_x = \frac{p - cma}{p}$$

Respecto a los resultados obtenidos, se estudian, en primer lugar, para los nueve escenarios considerados, las pautas evolutivas de la actividad inversora, la evolución de la competencia en el mercado de producción y los excedentes del sector así como su distribución entre industria y consumidores. El modelo basado en teoría de juegos se emplea también para estudiar el efecto de operaciones de consolidación empresarial que modificasen el grado de concentración de la industria, el papel de la retribución por garantía de potencia y el efecto de las barreras a la entrada sobre el desarrollo de la competencia en el sector.

Figura 2. Escenarios para demanda y coste del gas natural



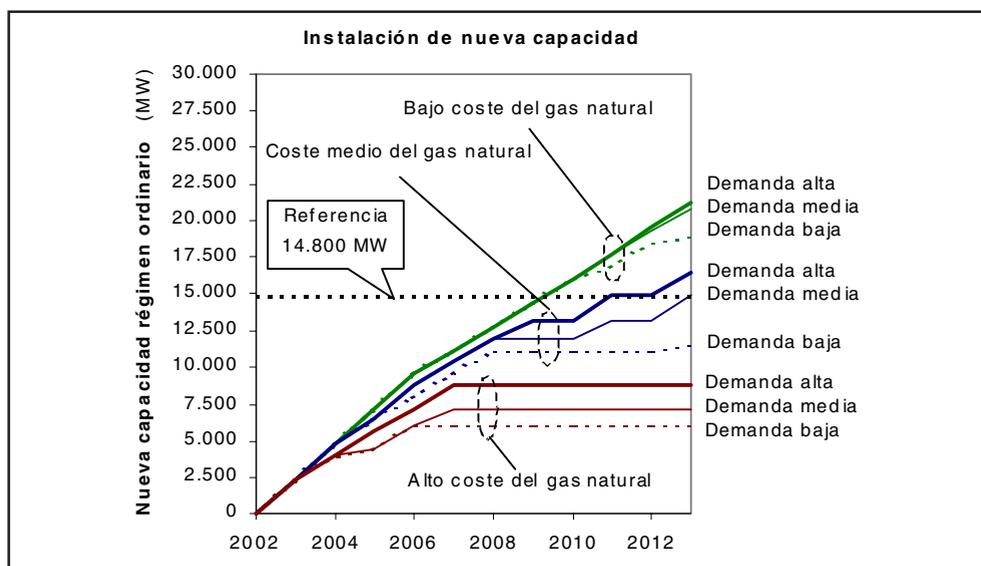
4.1. Evolución de la actividad inversora

Se considera, en primer lugar, la evolución de la actividad inversora en el sector y, en segundo lugar, el reparto de las inversiones entre las diferentes empresas.

El volumen agregado de inversiones en el sector depende principalmente de cómo evolucione el coste del gas natural y, en menor medida, de cual sea el ritmo de crecimiento de la demanda. Este resultado es intuitivo teniendo en cuenta que, bajo el nuevo marco regulador, las decisiones de inversión se dejan a las empresas y el coste del gas natural influye de manera sustancial en sus expectativas de rentabilidad, al representar del orden del 50% del coste total en los nuevos proyectos.

El volumen agregado de inversiones del sector se muestra en la figura 3 para los nueve escenarios considerados. Así, en escenarios de gas natural barato tendría lugar una intensa actividad inversora, superior a la requerida por el crecimiento de la de-

Siendo cma el coste marginal representativo del sector, calculado como media para las compañías productoras ponderada por sus respectivos volúmenes.

Figura 3. Evolución de la actividad inversora en el sector.

manda. En escenarios de coste medio, el ritmo de las inversiones estaría alineado con lo requerido por el crecimiento de la demanda, mientras que en escenarios de gas natural caro, la actividad inversora podría resultar insuficiente para garantizar la cobertura adecuada de la demanda.

Respecto al reparto de la actividad inversora por empresas, se encuentra que son las empresas menores y nuevos competidores los principales impulsores de este desarrollo. No estaría en el interés de las grandes empresas del sector tratar de disuadir a las empresas menores y entrantes anticipándose en asumir elevados compromisos de inversión. Para las grandes empresas del sector, cada proyecto, además de aportar el valor de la nueva central, supone un efecto externo negativo sobre el resto de su cuota de mercado. Esto hace que si una de las grandes empresas determinase, como conjetura inicial, el nivel de inversión que supone su óptimo individual, las empresas menores y entrantes, que solo consideran la rentabilidad del nuevo proyecto, a pesar de su desventaja en coste, seguirían encontrando el mercado suficientemente atractivo para invertir. Esto haría que la gran empresa reconsiderase su conjetura inicial reduciendo su nivel de inversión lo que, de nuevo, haría el mercado más atractivo a los entrantes. La iteración de ese razonamiento conduce a un equilibrio perfecto de Markov en el que la mayor parte de la actividad inversora es soportada por las empresas menores y nuevos entrantes.

Estos resultados abren la puerta para que en España, en escenarios habituales de precio de las materias primas energéticas, pueda producirse de forma natural una importante sustitución de carbón por gas natural en la producción de electricidad. Sin

embargo, si persisten en los próximos años los escenarios de elevados precios del petróleo (que repercuten en elevados precios para el gas natural) podría retrasarse la actividad inversora. Esto puede llevar a una situación en la que la capacidad productiva del sector no garantizase una cobertura adecuada de la demanda, lo cual requeriría la atención de las autoridades reguladoras.

Estos resultados justificarían que las principales empresas potenciasen la diversificación en sus estrategias, tanto en el ámbito geográfico como en sus líneas de negocio. Estas compañías invertirían en nuevas unidades CCGT en sustitución de otras centrales (fuel oil y carbón) operativamente más costosas o en tecnologías renovables (principalmente eólica) del régimen especial. Las nuevas centrales CCGT contribuirían también a la diversificación al ayudar a las compañías a alcanzar un volumen crítico en el suministro de gas natural, permitiendo entrar, con cierta economía de escala, en el negocio de comercialización de esta materia prima energética. En este entorno, la limitación impuesta en la regulación (Ley 54/97) a la ampliación de la cuota de mercado de las principales empresas resultaría redundante.

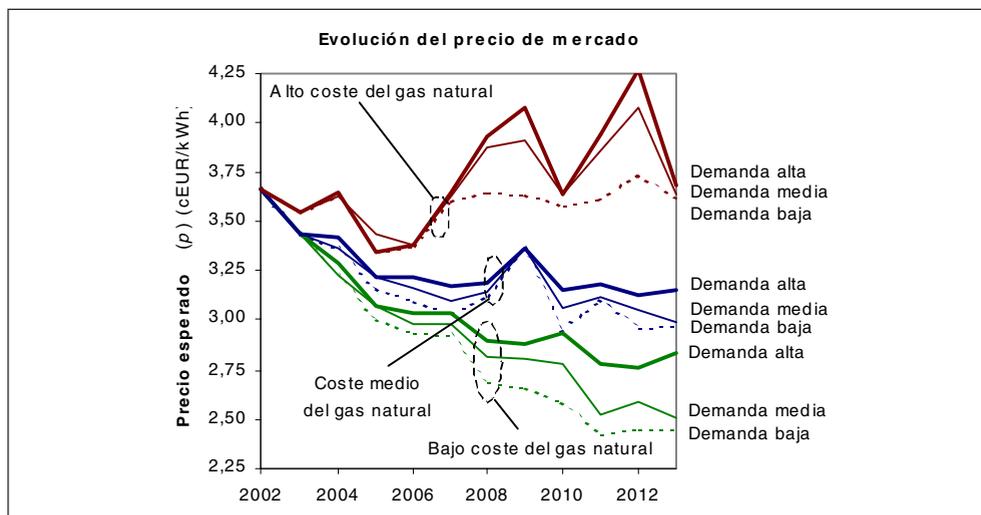
4.2. Evolución de la competencia en el mercado de producción

La evolución de la competencia en el mercado de producción es reflejo de las pautas expuestas anteriormente. Así, en escenarios de gas natural abundante y barato, en los que se produce una fuerte actividad inversora junto con la entrada de nuevos competidores, se reduciría la concentración industrial, intensificándose la competencia y conduciendo a una reducción en el precio de mercado esperado. De forma análoga, en escenarios de elevados precios del gas natural, el desarrollo de la competencia sería más limitado, incrementándose por tanto los precios esperados y pudiendo llegar a situaciones en las que la capacidad productiva fuese insuficiente para garantizar una adecuada cobertura de la demanda. La figura 4 muestra la evolución del precio esperado para los nueve escenarios considerados.

4.3. Evolución de los excedentes del sector

Como resultados económicos agregados del sector, la figura 5 muestra la evolución, a lo largo del horizonte de estudio, para los nueve escenarios considerados (demanda y coste del gas natural), el valor esperado (para los 27 escenarios de coste de carbón, fuel oil y disponibilidad de agua) del excedente del consumidor, excedente de la industria, excedente total e ineficiencias del sector, medidos en relación a su valor en el año 2002.

En escenarios de menor coste del gas natural se reduce en mayor medida el excedente de la industria como consecuencia del elevado coste que suponen las inversiones y al incrementarse la competencia en el mercado de producción. En dicho entorno crecería también más el excedente del consumidor como consecuencia del menor

Figura 4. Evolución del precio esperado de mercado

precio esperado en el mercado. Estos dos factores hacen que el excedente total del mercado dependa en menor grado de cómo evolucione el coste del gas natural y en mayor medida de cual sea el ritmo de crecimiento de la demanda.

La ineficiencia del sector, medida como pérdida en el excedente total en relación al comportamiento precio aceptante de todas las empresas, se mantiene en valores reducidos en todos los escenarios. En general, la ineficiencia del sector se incrementa ante escenarios en los que se produce una transferencia de excedente desde la industria hacia los consumidores, como resultado de la resistencia que las empresas oponen a este flujo.

La figura 6 muestra la distribución de la ineficiencia del sector, expresada como fracción del excedente total, obtenida mediante simulación de Montecarlo de 60000 escenarios en el año 2002 para los posibles valores de los factores exógenos caracterizados según sus correspondientes funciones de distribución.

4.4. Efecto de la concentración industrial

Para evaluar el efecto de la concentración industrial en la situación actual del mercado se ha resuelto el modelo que describe la competencia en el año 2002 con diferentes configuraciones empresariales, desde el monopolio, hasta la competencia perfecta y pasando por la estructura de la industria en el año 2002. La tabla 2 resume estos resultados. El excedente de los consumidores, excedente de la industria y las ineficiencias del sector se cuantifican en relación a la situación de competencia perfecta.

Figura 5. Evolución de los excedentes del sector

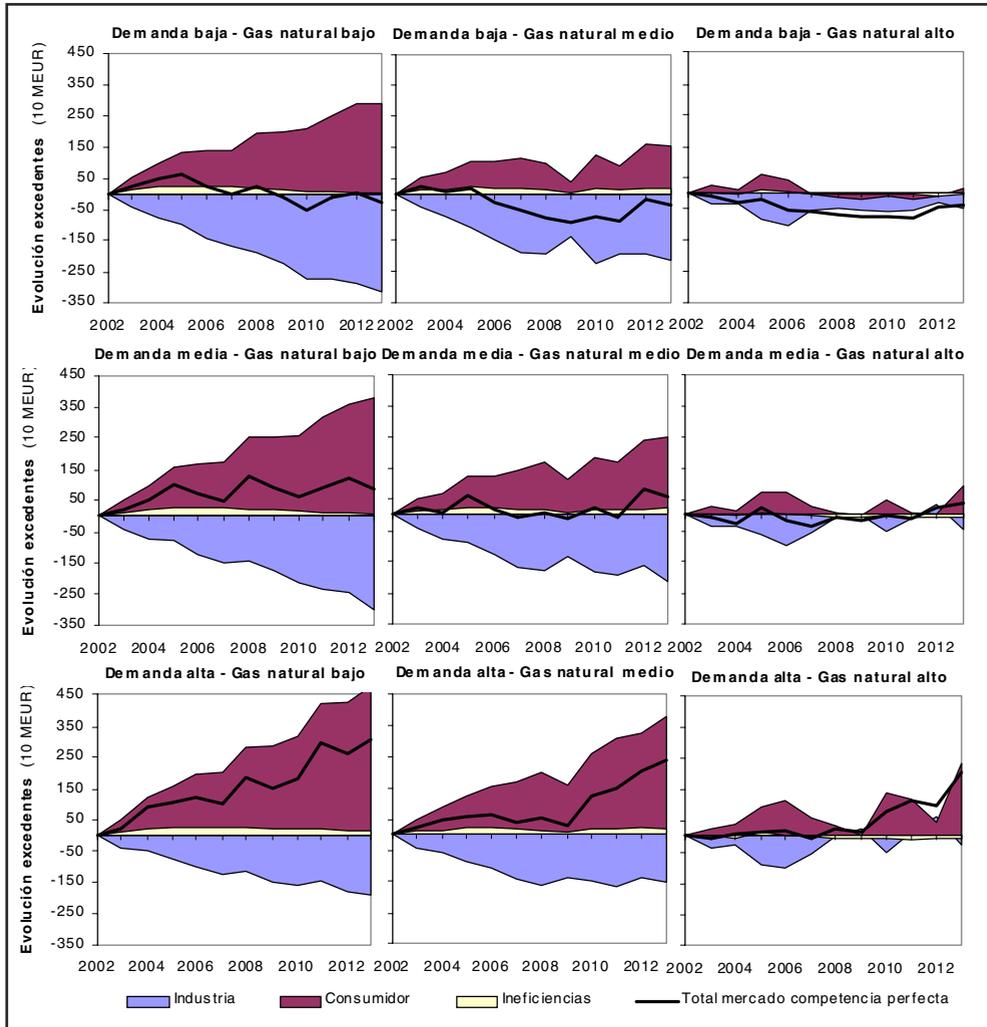


Figura 6. Fracción de ineficiencias sobre excedente total. Distribución Montecarlo 2002

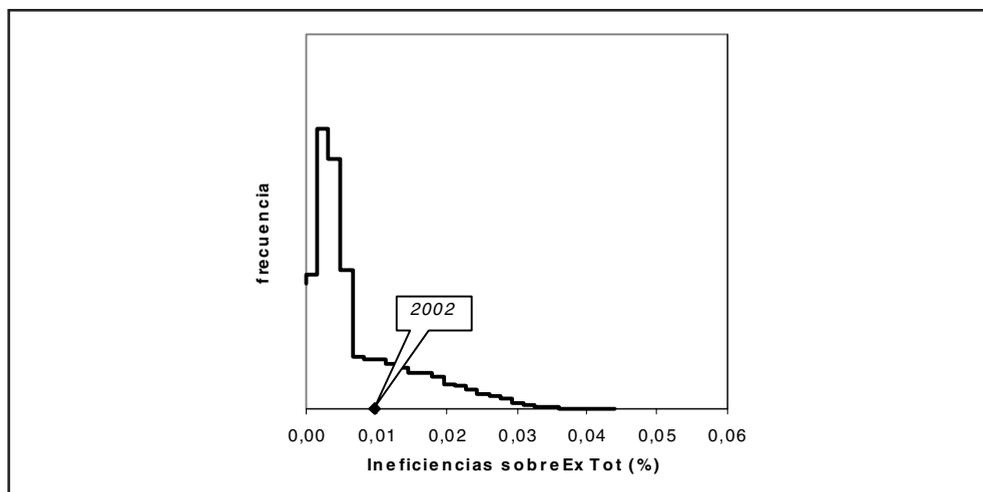


Tabla 2. Efecto de la concentración industrial

	<i>HHI</i>	<i>p</i> (cEUR/kWh)	ΔEx_{con} (MEUR)	ΔEx_{ind} (MEUR)	INEFICIENCIA TOTAL (MEUR)	INEFICIENCIA EN COSTE (MEUR)	
MONOPOLIO	1	4,72	-1.565	541	1.024	0	
AUMENTO DE LA CONCENTRACIÓN (<i>ic</i>)	90%	0,863	4,63	-1.446	533	913	4,1
	80%	0,746	4,55	-1.323	518	805	8,3
	70%	0,647	4,47	-1.196	495	702	12,4
	60%	0,563	4,38	-1.066	464	602	16,6
	50%	0,492	4,30	-931	426	505	20,7
	40%	0,433	4,22	-793	380	413	24,8
	30%	0,384	4,13	-651	326	325	29,0
	20%	0,344	4,05	-505	265	240	33,1
10%	0,311	3,97	-355	196	159	37,1	
MERCADO 2002	0,286	3,89	-210	127	83	14,6	
DISMINUCIÓN DE CONCENTRACIÓN (<i>id</i>)	10%	0,234	3,83	-93	64	30	0
	20%	0,184	3,82	-83	57	26	0
	30%	0,141	3,82	-73	50	23	0
	40%	0,103	3,81	-62	43	20	0
	50%	0,071	3,81	-52	36	16	0
	60%	0,047	3,78	0	0	0	0
	70%	0,027	3,78	0	0	0	0
	80%	0,012	3,78	0	0	0	0
	90%	0,003	3,78	0	0	0	0
COMPETENCIA PERFECTA	0	3,78	0	0	0	0	

Según estos resultados, la eficiencia del sector podría incrementarse significativamente mediante una pequeña desinversión, del orden del 10% de la capacidad instalada de las principales empresas. Esto justificaría medidas como las adoptadas en el mercado británico donde la introducción de la competencia se acompañó con desinversiones de las principales empresas (Green 1996). En sentido contrario, las operaciones de concentración industrial que implicasen a las principales compañías estarían desaconsejadas por su potencial efecto sobre el poder de mercado y deberían ser convenientemente supervisadas.

4.5. Efecto de la retribución por garantía de potencia

El modelo basado en teoría de juegos permite estudiar el efecto de la actual retribución por garantía de potencia. Al tratarse de un pago que se recauda directamente de los consumidores, sus variaciones inducirían cambios en sentido contrario en la función de demanda, vía precio. Así, ante una reducción en la retribución por garantía de potencia, las empresas serían capaces de recuperar a través del mercado la mayor parte de lo que dejasen de ingresar por este concepto. Especialmente, serían las empresas menores las que estarían en mejores condiciones de recuperar esas cantidades, al ser las que ponen en juego en el mercado una mayor proporción de su capacidad instalada. Por el contrario, las grandes compañías prefieren cobrar la garantía de potencia por tener disponibles sus centrales, restringiendo después su producción en ejercicio de poder de mercado.

En el corto plazo, el efecto neto de una reducción en el pago por garantía de potencia sería una transferencia de beneficios desde las grandes compañías hacia los consumidores y pequeñas empresas junto con una leve mejora en la eficiencia del sector. Dada la limitada capacidad del pago por garantía de potencia para influir en los resultados de las empresas, su efecto a más largo plazo, teniendo en cuenta la actividad inversora, es también reducido.

Considerando estos resultados y teniendo en cuenta el efecto del coste del gas natural sobre el desarrollo del sector, se propone estudiar un mecanismo alternativo de retribución por garantía de potencia que sea variable en función del coste del gas natural y percibido únicamente por los nuevos proyectos, de forma que, ante escenarios de elevado coste de esta materia prima, el pago por garantía de potencia se incrementaría para reducir así el déficit de actividad inversora, mientras que, ante escenarios de gas natural barato, en los que la actividad inversora puede ser excesiva, el pago por garantía de potencia se reduciría.

4.6. Efecto de las barreras a la entrada

Los resultados anteriores ponen de manifiesto que la entrada de nuevos competidores está llamada a jugar un importante papel en el desarrollo del sector. Por este

motivo se ha empleado el modelo basado en teoría de juegos para estudiar el efecto que podrían tener diferentes tipos de barreras a la entrada.

Se consideran, en primer lugar, aquellas barreras que tuvieran su origen en la autoridad reguladora imponiendo un límite en el máximo número de proyectos permitidos a los nuevos competidores. Ante escenarios de reducido coste del gas natural, en los que el volumen de inversiones podría ser excesivo, este tipo de barreras restringiría la entrada y mejoraría el excedente total del sector, aunque reduciría la transferencia de beneficios desde la industria hacia los consumidores al limitar el desarrollo de la competencia. Ante escenarios de gas natural caro en los que la actividad inversora sería insuficiente, estas barreras a la entrada no conducirían a un resultado muy distinto, puesto que, en tal caso, la falta de inversión sería debida a las pocas expectativas de rentabilidad y las barreras a la entrada no supondrían una restricción activa.

En segundo lugar, se considera como barrera a la entrada la desventaja en coste de los nuevos competidores. Se ha resuelto el modelo incrementando el coste de capital soportado por los nuevos competidores en sus proyectos de inversión. La desventaja en costes reduce la entrada en todos los escenarios, perjudica el excedente de los consumidores mientras mejora el beneficio de las grandes empresas a expensas de los recién llegados.

En tercer lugar, se consideran aquellas barreras a la entrada que pudieran tener su origen en la conducta, dentro de las reglas del mercado, de las empresas establecidas en el sector. En su participación en el mercado de producción puede pensarse en el empleo de estrategias del tipo precio límite (Bain 1956), de forma que las empresas establecidas reducirían el precio de mercado con objeto de desanimar las expectativas de rentabilidad de los potenciales entrantes. Sin embargo en un entorno de información completa, el análisis mediante teoría de juegos (Romp 1997) permite descartar esta estrategia al estar basada en una amenaza no creíble. Así, los nuevos competidores saben que el único objeto de esta estrategia es evitar su entrada y, caso que decidiesen invertir, las empresas del sector no tendrían incentivo para seguir manteniendo el precio por debajo de ningún límite. En su toma de decisiones de inversión, las empresas establecidas pueden tratar de evitar la entrada anticipándose en asumir elevados compromisos de inversión que agotasen la rentabilidad futura del sector. Este tipo de disuasión sí representa una amenaza creíble al alterar la estructura de la competencia. Sin embargo, el análisis cuantitativo de los incentivos individuales mediante el equilibrio perfecto de Markov no apunta la aparición de este tipo de estrategias. Según estos resultados, no se espera que las empresas del sector empleen su conducta competitiva para erigir barreras a la entrada.

5. CONCLUSIONES

En cuanto a los principales resultados del trabajo, la situación actual de la competencia indica un significativo ejercicio de poder de mercado, aunque se encuentra

sustancialmente más cerca del resultado perfectamente competitivo que de la situación de monopolio.

Una ligera reducción de las cuotas de mercado de las principales empresas podría promover la competencia de forma significativa y, en sentido contrario, las operaciones de concentración empresarial deberían ser convenientemente supervisadas por su potencial efecto sobre el poder de mercado.

La disponibilidad de agua para producción hidroeléctrica resulta ser el factor con mayor capacidad para influir en los resultados del mercado en el corto plazo.

El estudio de la evolución de la competencia en el largo plazo muestra como el mercado ofrece incentivos para la inversión, aunque su desarrollo dependerá de forma importante de cual sea la evolución del coste del gas natural. En este sentido, mientras que un bajo precio podría conducir a un exceso de inversión ineficiente, en escenarios de elevado coste de esta materia prima, podría producirse un déficit en la capacidad instalada que requeriría la atención del regulador.

La actividad inversora sería liderada por las empresas menores y por la entrada de nuevos competidores, mientras que las empresas establecidas no emplearían sus estrategias de inversión para erigir barreras a la entrada.

Ciertas barreras a la entrada podrían mejorar el excedente total en escenarios de elevado ritmo de inversiones, aunque limitarían la transferencia de excedente de la industria a los consumidores.

El pago por garantía de potencia tiene reducida capacidad de influir sobre la actividad inversora. Se propone estudiar un mecanismo alternativo, que sea variable en función del coste del gas natural, con el objeto de mitigar el efecto de este factor sobre el desarrollo del sector.

El análisis realizado en este trabajo puede ser de utilidad a las empresas, ayudando a mejorar su entendimiento de los incentivos económicos y a favorecer sus intereses en interacción con los de sus competidores. Las empresas pueden emplear el análisis de la teoría de juegos en la elaboración de sus estrategias, adaptando sus respuestas de forma óptima a las acciones y características de sus rivales, teniendo en cuenta el desarrollo de los factores exógenos, de gran incidencia en este sector. En este sentido, el modelo basado en el juego dinámico puede emplearse como herramienta en el análisis de inversiones o en la valoración de empresas, considerando la suma descontada de flujos de caja, valorando las opciones reales e incorporando la interacción estratégica en la toma de decisiones.

Este enfoque puede ser de utilidad también para las autoridades reguladoras. Bajo el nuevo marco regulador, las decisiones de producción y de inversión, con implicaciones fundamentales en el desarrollo del sector, se dejan en manos de las empresas. Precisamente, la teoría de juegos enfoca su análisis en esta toma de decisiones descentralizada e individualista. Además, permite determinar, de forma cuantitativa, el resultado del equilibrio imperfectamente competitivo, la eficiencia del mercado y la distribución de su excedente entre la industria y los consumidores.

Resulta, por tanto, una herramienta adecuada para estudiar operaciones de concentración industrial, así como para comparar diferentes alternativas ante posibles modificaciones del marco regulador.

REFERENCIAS

- Bellman, R., (1954) Some Applications of the Theory of Dynamic Programming- A Review, *Journal of the Operations Research Society of America*, 2 (3), pp. 275-288.
- Benkard, C., (2004) A dynamic analysis of the market for wide-bodied commercial aircraft, *Review of Economic Studies*, 71, pp. 581-611.
- Bain, J., (1956) *Barriers to New Competition. Their Character and Consequences in Manufacturing Industries*, Harvard University Press, Massachusetts.
- Borenstein, S., Bushnell, J., Knittel, C., (1999) Market Power in Electricity Markets: Beyond Concentration Measures, *The Energy Journal*, 20 (4), pp. 65-88.
- Cox, J., Ross, S., (1976) The valuation of options for alternative stochastic processes, *Journal of Financial Economics*, 3 (1-2) pp. 145-166.
- Doblado, J. M., Nieto, C., Santos, J., (2003) *Juegos de estrategia. Una revolución silenciosa en la economía y en la empresa*, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid.
- Ericson, R., Pakes, A., (1995) Markov-Perfect Industry Dynamics: A Framework for Empirical Work, *Review of Economic Studies*, 62, pp. 53-82.
- Fabra J., (2004) *¿Liberalización o regulación? Un mercado para la electricidad*. Marcial Pons. Madrid.
- von der Fehr, N. H., Harbord, D., (1993) Spot market competition in the UK electricity industry, *The Economic Journal*, 103, pp. 531-546.
- Friedman, J. W. (1977) *Oligopoly and the Theory of Games*, Amsterdam: North-Holland.
- Fudenberg, D., Levine, D., (1988) Open-Loop and Closed-Loop Equilibria in Dynamic Games with Many Players, *Journal of Economic Theory*, 44 (1), pp. 1-18.
- Fudenberg, D., Tirole, J., (1991) *Game Theory*, The MIT Press, Massachusetts.
- Green, R., (1996) Increasing Competition in the British Electricity Spot Market, *The Journal of Industrial Economics*, 44 (2), pp. 205-216.
- Haurie, A., Zaccour, G., Smeers, Y., (1990) Stochastic Equilibrium Programming for Dynamic Oligopolistic Markets. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 66 (2), pp. 243-253.
- IEA, International Energy Agency, (2002) *Energy Prices and Taxes*, Paris, Edición trimestral.
- Klemperer, P. D., Meyer, M. A., (1989) Supply Function Equilibria in Oligopoly Under Uncertainty, *Econometrica*, 57 (6), pp. 1243-1277.

- Ministerio de Economía, (2002) *Planificación de los sectores de electricidad y gas. Desarrollo de las redes de transporte 2002-2011*, Madrid.
- Ocaña, C., Romero, A., (1998) *Una simulación del funcionamiento del pool de energía eléctrica en España*, CNSE (Comisión Nacional del Sistema Eléctrico), Documento de Trabajo, DT 002/98.
- REE, Red Eléctrica de España, (2002) *El Sistema Eléctrico Español*, Informe anual de operación del mercado.
- Romp, G., (1997) *Game Theory. Introduction and Applications*, Oxford University Press.
- Stoft, S., (2002) *Power System Economics*, IEEE Press, Wiley-Interscience, John Wiley & Sons.
- Tirole, J., (1995) *The Theory of Industrial Organization*, The MIT Press, Massachusetts.
- Vedenov D., Miranda, M., (2001) Numerical solution of dynamic oligopoly games with capital investment, *Economic Theory*, 18, pp. 237-261.
- Vives, X., (1999) *Oligopoly Pricing: Old Ideas and New Tools*, The MIT press.