

Revisión de las Tendencias de Modelado de la Explotación de la Generación en Mercados de Generación Eléctrica

Mariano Ventosa

Michel Rivier

Andrés Ramos

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA
Universidad Pontificia Comillas
Alberto Aguilera 23
28015 Madrid, SPAIN
mariano.ventosa@iit.upco.es

Resumen

La organización de la industria eléctrica a escala internacional ha experimentado en la última década cambios significativos a un ritmo sin precedentes en su historia. Coincidiendo con este proceso, el interés de los investigadores por el desarrollo de modelos adaptados a las nuevas circunstancias ha crecido dando lugar a numerosas publicaciones. Sin embargo, las líneas metodológicas están poco definidas por lo reciente de estos desarrollos.

En este artículo se presenta una amplia revisión de las publicaciones más relevantes sobre el modelado de la explotación de la generación en los mercados eléctricos que pretende clarificar el panorama, proponiéndose una clasificación de los distintos enfoques de modelado recogidos en la literatura científica.

Palabras clave: Mercados de producción de electricidad y modelado de la explotación.

1. Introducción

La organización de la industria eléctrica a escala internacional ha experimentado en la última década cambios significativos a un ritmo sin precedentes en su historia, con el propósito de establecer nuevos esquemas regulatorios basados en los principios de equidad, transparencia y libre competencia. El objetivo último de estas transformaciones consiste en conseguir una mejora de la eficiencia mediante la introducción de mecanismos de mercado en aquellas actividades que pueden realizarse en condiciones competitivas, como es el caso del negocio de generación. En particular los estudios, análisis y modelado del funcionamiento de los mercados de generación de electricidad han despertado gran interés por parte tanto de las empresas productoras como del regulador y en consecuencia, por su novedad, han sido objeto de investigación por la comunidad científica. Esto ha dado origen a numerosas publicaciones que tratan de conjugar el modelado realista del comportamiento estratégico de las empresas con la representación técnica detallada de la explotación de los medios de producción.

Sin embargo, por lo reciente de estos desarrollos existe cierta confusión en cuanto a la diversidad de metodologías y modelos que se están proponiendo. La revisión de las tendencias de modelado que se presenta en este artículo pretende clarificar el panorama clasificando los distintos enfoques de modelado propuestos en la literatura científica.

2. Tendencias de modelado de los mercados eléctricos

La clasificación que se propone en este artículo sobre las tendencias más representativas de modelado del mercado de generación de electricidad se representa esquemáticamente en la figura 1. En ella quedan recogidas de forma coherente y organizada las propuestas de modelos y metodologías recogidos en la literatura técnica, permitiendo situarlas y clasificarlas.

En las secciones 3 y 4 se repasan siguiendo dicho esquema las dos grandes tendencias de modelado de los mercados reales de generación de electricidad:

- Representación del problema de explotación óptima de una única empresa donde el comportamiento de sus competidores se sintetiza en el modelado del precio.
- Representación explícita del equilibrio del mercado mediante la consideración de la competencia entre todas las empresas.

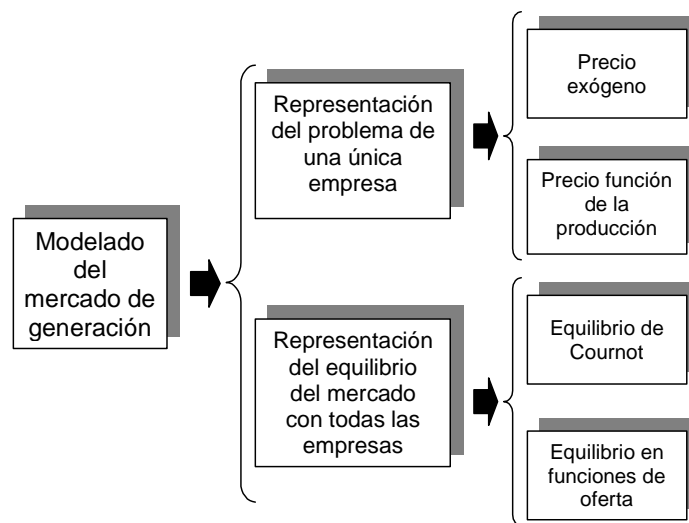


Figura 1. Representación esquemática de las tendencias de modelado del mercado de generación de electricidad

3. Representación de la explotación óptima de una única empresa

Esta primera gran tendencia de modelado agrupa los trabajos centrados en la representación del problema de optimización de una única empresa: maximización del margen de contribución individual –ingresos variables menos costes variables– sujeto a las restricciones que se consideren relevantes para la empresa. Debido a que estos planteamientos no consideran la competencia entre todas las empresas, la representación del mercado se reduce al modelado del precio.

Los trabajos que siguen esta primera tendencia se pueden clasificar en dos grupos, en función de las hipótesis realizadas sobre el modelado del precio del mercado:

- Modelado del precio como una variable exógena al problema de optimización.
- Consideración explícita de la relación entre el precio y las decisiones de la propia empresa.

3.1 Precio exógeno

El nivel más simple de modelado del mercado consiste en representar el precio como una variable exógena del problema de optimización de la empresa en estudio. De esta forma la no linealidad intrínseca de la función que relaciona los ingresos variables procedentes del mercado –precio multiplicado por la producción– desaparece, pudiéndose formular y resolver el problema de maximización del beneficio de cada empresa empleando optimización lineal. Sin embargo, al no considerar estos modelos la relación entre el precio y la propia producción sólo son aptos para su aplicación a los mercados cuasiperfectos o para el estudio del funcionamiento de empresas de reducido tamaño [1].

En [2] se resuelve el problema de optimización de la producción considerando competencia perfecta, y en el que además, el precio es conocido de antemano. El planteamiento anterior se puede mejorar notablemente considerando la incertidumbre en el precio. En [3] se presenta un modelo probabilista de gestión óptima de la cartera de contratos y de la generación hidráulica de una empresa, que considera como variables aleatorias el precio y las aportaciones hidráulicas. Posteriormente en [4] se propone un modelo inspirado en el anterior que incorpora la generación térmica. El problema de optimización estocástica de muy gran tamaño que resulta, se resuelve mediante descomposición de Benders.

3.2 Precio dependiente de la producción

A diferencia de la línea de trabajo anterior que considera el precio como una variable exógena, existe otra interesante línea de investigación que considera explícitamente la influencia sobre el precio de las decisiones de la empresa en estudio. Estos trabajos se centran en el problema de maximización, con alcance de corto plazo, del beneficio de una empresa frente a la demanda residual cedida por sus competidores en mercados formados por pocas empresas.

La justificación intuitiva de este planteamiento se sustenta sobre la siguiente idea. En el corto plazo las empresas expresan sus intenciones a través de sus curvas de oferta, por tanto la estimación de dichas curvas supone la mejor representación posible de su comportamiento, aunque esta representación sea una caracterización estática.

En esta línea, existen varios trabajos de investigación de reciente publicación que modelan el problema de optimización de corto plazo de las empresas generadores de forma determinista [5][6] y también de forma probabilista considerando la incertidumbre en el comportamiento tanto de la demanda como de las empresas competidoras [7][8]. Estos últimos están orientados a la formación de ofertas de venta al mercado al considerar de forma explícita la incertidumbre del mercado.

4. Representación del equilibrio del mercado

En esta segunda gran tendencia de modelado se agrupan los trabajos orientados a la obtención del equilibrio del mercado mediante la representación del comportamiento de todas las empresas que compiten en el mismo. En [9] se puede encontrar una revisión parcial de esta línea de trabajo que distingue entre dos enfoques que se diferencian según las hipótesis realizadas sobre las estrategias en las que compiten las empresas. El enfoque más tradicional y extendido considera que las empresas eléctricas compiten con

estrategias de cantidad, como en el modelo de Cournot. Mientras que el segundo enfoque, más sofisticado que el anterior, plantea el equilibrio del mercado en funciones de oferta.

Ambos planteamientos se basan en la obtención del equilibrio del mercado en el sentido de Nash¹, con estrategias de cantidad y con estrategias de curvas de oferta respectivamente.

4.1 Equilibrio de Cournot

El planteamiento conceptual del equilibrio de Cournot es más sencillo y práctico que el equilibrio en funciones de oferta, lo que permite incorporar con mayor facilidad las especiales características de los medios de producción que afectan al funcionamiento de los mercados eléctricos.

La argumentación teórica que justifica la validez de este planteamiento para representar el comportamiento de los mercados formados por pocas empresas ha sido investigada y discutida ampliamente por la microeconomía. En [10] se puede encontrar una amplia reflexión al respecto, que refrenda el modelo de Cournot como patrón de funcionamiento de los mercados en condiciones de competencia imperfecta.

Uno de los primeros trabajos que emplea el equilibrio de Cournot como modelo de los mercados eléctricos reales se presenta en [11]. Posteriormente en [12] se amplía este enfoque desarrollando un modelo de simulación del mercado eléctrico californiano que calcula el equilibrio del mercado de forma iterativa. Un procedimiento alternativo para el cálculo del equilibrio del mercado empleando un problema de optimización equivalente se propone en [13]. En [14] se presenta el problema complementario como una metodología potente y flexible para el diseño de modelos de explotación de la generación en un contexto de competencia imperfecta. Este procedimiento permite considerar la maximización simultánea del beneficio de todas las empresas que compiten en el mercado teniendo en cuenta las limitaciones de sus medios de producción.

El problema de la coordinación hidrotérmica en un contexto de competencia imperfecta se aborda por primera vez en [15]. El modelo propuesto emplea la técnica matemática de la programación dinámica en la que en cada etapa se resuelve el equilibrio de Cournot en el caso de un duopolio. En [16] se plantean las condiciones de equilibrio del mercado de forma analítica de las que se pueden extraer valiosas conclusiones sobre el papel de la generación hidráulica en un mercado eléctrico. Recientemente, en [17] se emplea de nuevo programación dinámica y teoría de juegos para revisar, sobre un pequeño caso estudio, el significado del valor del agua en un contexto de competencia imperfecta. Por otro lado en [18] se incorpora la influencia de la incertidumbre en las aportaciones en un modelo que combina el problema complementario –para el modelado del mercado– con la programación dinámica estocástica –para la resolución de problemas de gran tamaño–.

La influencia de las congestiones de la red de transporte sobre el comportamiento de las empresas generadoras es un tema de interés que ha dado lugar a interesantes desarrollos. En [19][20][21] se propone modelar el mercado eléctrico con discriminación espacial de

¹ Se define equilibrio de Nash al resultado de un juego (en nuestro caso el mercado) en el que ningún jugador (empresa) mejora su beneficio modificando unilateralmente su estrategia.

precios. Recientemente en dos trabajos [22][23] se emplea el problema complementario como procedimiento de resolución numérica del equilibrio del mercado lo que supone un avance notable al permitir el estudio de casos de mayor tamaño.

Las particularidades de los mercados eléctricos reales no han permitido trasladar con facilidad las herramientas empleadas para la gestión del riesgo en los mercados financieros. En [24] se propone un procedimiento de valoración del riesgo frente a la incertidumbre en las aportaciones, la demanda y el precio de los combustibles que considera el equilibrio del mercado mediante la utilización de un modelo de simulación descrito en [25].

4.2 Equilibrio en funciones de oferta

El modelo teórico de equilibrio propuesto por Green y Newbery [26] constituye posiblemente el trabajo de investigación relacionado con el modelado del comportamiento de los mercados eléctricos –concretamente del caso inglés– que mayor difusión ha tenido. Su enfoque es una aplicación del desarrollo de Klemperer y Meyer [27] sobre la caracterización de los mercados oligopolistas basada en el equilibrio en funciones de oferta. En contraste con el equilibrio en competencia en cantidades de Cournot, el equilibrio propuesto por Klemperer y Meyer considera que las empresas realmente compiten a través de sus curvas de oferta. Green y Newbery combinan el soporte teórico que supone el mencionado equilibrio con que en el caso inglés las empresas deben ofertar una única curva de oferta para todas las horas del día. De esta forma la curva de oferta debe internalizar la variabilidad de la demanda a lo largo del día, lo que implica considerar la incertidumbre asociada a su valor.

Estudios posteriores han mejorado este enfoque al permitir el tratamiento de funciones de oferta escalonadas [28]. Más recientemente en [29] se incorporan los costes de transición a la competencia (CTCs) en el cálculo de las funciones de oferta que satisfacen las condiciones de equilibrio descritas por Klemperer y Meyer.

Sin embargo, y pese a los avances logrados, este enfoque probabilista sigue teniendo mayor valor teórico que práctico debido a que se obtienen múltiples soluciones que verifican las condiciones de equilibrio en funciones de oferta.

5. Conclusiones

En este artículo se presenta una revisión del estado del arte en cuanto al modelado de la explotación de la generación en un contexto de competencia. Los trabajos considerados se han clasificado en dos grupos que representan dos tendencias modelado claramente diferentes. Por un lado están los modelos que representan el problema de optimización de una única empresa en los que comportamiento del mercado se sintetiza en el modelado del precio y por otro lado están aquellos modelos que consideran explícitamente el equilibrio del mercado resultante de la competencia entre todas las empresas.

Agradecimientos

Nuestro sincero agradecimiento a la Dirección del Mercado Mayorista de Iberdrola y al Ministerio de Ciencia y Tecnología (Proyecto SEC99–0199).

Referencias

- [1] Varian, H.R. *Microeconomic Analysis*. W.W. Norton & Company. New York. 1992.
- [2] Gross, G., Finlay, D. J., "Optimal Bidding Strategies in Competitive Electricity Markets". *12th PSCC Conference*, Germany. pp. 815-823. August 1996.
- [3] Fleten, S. E., Wallace, S. W., Ziemba, W. "Portfolio management in a deregulated hydropower based electricity market". *Proceedings Hydropower97*, Norway. 1997.
- [4] Pereira, M. V. "Methods and tools for contracts in a competitive framework". CICRÉ Task Force 30-05-09, August 1999.
- [5] García, J., Román, J., Barquín, J., González, A., "Strategic Bidding in Deregulated Power Systems". *13th PSCC Conference*, Norway. Vol. 1 pp. 258-264. June 1999.
- [6] Baílo, A., Ventosa, M., Ramos, A., Rivier, M., Canseco, A., "Strategic Unit Commitment for Generation Companies in Deregulated Electricity Markets". DIMACS/EPRI Workshop *The Next Generation of Unit Commitment Models*. Rutgers University, September 1999.
- [7] E. J. Anderson, A. B. Philpott, "Optimal offer curve construction in electricity markets". *Technical report of Engineering Science Department*, University of Auckland, New Zealand, Available at <http://www.esc.auckland.ac.nz/People/Staff/Philpott>. May 1999.
- [8] Baílo, A., Ventosa, M., Ramos, A., Rivier, M. "Strategic Bidding under Uncertainty in a Competitive Electricity Market". *PMAFS00 Conference*. Madeira 2000.
- [9] Kahn, E. "Numerical techniques for analyzing market power in electricity". *The Electricity Journal*. pp. 34-43. July 1998.
- [10] Daughety, A. F., *Cournot Oligopoly*. Cambridge University Press 1988.
- [11] Borenstein, S., Bushnell, J., Kahn, E. and Stoft, S. "Market Power in California Electricity Markets". *Utilities Policy*. Vol. 5 No. 3/4 pp. 219-236. 1995.
- [12] Borenstein, S. and Bushnell, J. "An Empirical Analysis of the Potential for Market Power in California's Electricity Industry". *Journal of Industrial Economics*, Vol. 47, No. 3, September, 1999.
- [13] Ramos, A., Ventosa, M., Rivier, M. "Modeling Competition in Electric Energy Markets by Equilibrium Constraints". *Utilities Policy*, Vol. 7 Issue 4 pp. 233-242, Dec. 98.
- [14] Rivier, M., M. Ventosa, A. Ramos. "A Generation Operation Planning Model in Deregulated Electricity Markets based on the Complementarity Problem". *Applications and algorithms of complementarity*. M. C. Ferris, O. L. Mangasarian and J.-S. Pang, editors, Kluwer Academic Publishers. 2001.
- [15] Scott, T.J. and Read, E.G. "Modelling Hydro Reservoir Operation in a Deregulated Electricity Market". *International Transactions in Operational Research*. Vol. 3 pp. 243-253. 1996.
- [16] Bushnell, J. "Water and Power: Hydroelectric Resources in the Era of Competition in the Western US". *POWER Conference on Electricity Restructuring*. University of California Energy Institute. Berkley. 1998.
- [17] Barquín, J., García-Gonzalez, J., Román, J. "Water value in competitive markets: dynamic programming and game theory". *PMAFS00 Conference*. Madeira 2000.
- [18] Ventosa, M., García-Alcalde, A., Mencía, A., Rivier, M., Ramos, A. "Modeling Inflow Uncertainty in Electricity Markets: A Stochastic MCP Approach". *PMAFS00 Conference*. Madeira 2000.
- [19] Hogan, W.W. "A Market Power Model with Strategic Interaction in Electricity Networks". *The Energy Journal* 18 (4), pp. 107-141, 1997.
- [20] Oren, S. "Economic Inefficiency of Passive Transmission Rights in Congested Electrical System with Competitive Generation", *The Energy Journal* 18 (1), pp. 63-83, 1997.
- [21] Hobbs B. F., Metzler C., Pang J. S. "Strategic Gaming Analysis for Electric Power Networks: An MPEC Approach". *IEEE Trans. Power Systems*. 1998.
- [22] Hobbs B. F. "LCP Models of Nash-Cournot Competition in Bilateral and POOLCO-Based Power Markets". *Proceedings, IEEE Winter Power Meeting*, NY City, Feb. 1999.
- [23] Wei. Jing-Yuan, Y. Smeers. "Spatial Oligopolistic Electricity Models with Cournot Generators and Regulated Transmission Prices". *Operations Research*, Vol. 47, No. 1, January - February 1999, pp. 102 - 112.
- [24] Batlle, C., Otero-Novas, I., Alba, J. J., Meseguer, C., Barquín, J. "A model based in numerical simulation techniques as a tool for decision-making and risk management in a wholesale electricity market. Part I: General structure and scenario generators". *PMAFS00 Conference*. Madeira 2000.
- [25] Otero-Novas, I., Meseguer, C., Alba, J.J. "An Iterative Procedure for Modelling Strategic Behaviour in Competitive Generation Markets". *13th PSCC Conference*, Norway. July 1999, pp. 251-257.
- [26] Green, R. J. and Newbery, D. M. "Competition in the British Electricity Spot Market". *Journal of Political Economy*. Vol. 100 No. 5 pp. 929-953. 1992.
- [27] Klemperer, P. D. y Meyer, M. A. "Supply Function Equilibria in Oligopoly under Uncertainty". *Econometrica*, Vol. 57, No. 6, pp. 1243-1277. November, 1989.
- [28] Rudkevich, A., Duckworth, M. and Rosen, R. "Modeling electricity pricing in a deregulated generation industry: The potential for oligopoly pricing in a Poolco". *The Energy Journal*. Vol. 19 No. 3. pp. 19-48. 1998.
- [29] Castillo del, J. I., Barquín, J. "Oligopolistic Electrical Market Competition, Stranded Cost and Uncertainty: A Supply Function Approach" *PMAFS00 Conference*. Madeira 2000.