

# ELEMENTOS PARA EL PLANEAMIENTO DE LA EXPANSION DE SISTEMAS DE GENERACION EN AMBIENTES DE COMPETENCIA

---

*Ricardo A. Smith.  
Posgrado en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos  
Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia,  
Sede Medellín*

## RESUMEN

**E**l Sector Eléctrico Colombiano (SEC) se encuentra en un nuevo ambiente con respecto al mercado de la energía generada en donde se trata de fomentar la competencia, con el objeto de incentivar la eficiencia en las empresas generadoras y lograr la participación privada. El planeamiento de la expansión del sector que antes se hacía de manera centralizada, sectorizada y obligatoria, ahora se hace de manera indicativa y no obliga a la realización de ningún proyecto específico. En este trabajo se trata de analizar los nuevos elementos a tener en cuenta en el planeamiento de la expansión del SEC en un ambiente de competencia. Algunas enseñanzas del caso inglés se retoman y plantean para el caso colombiano. Pareciera que las herramientas de optimización duras tradicionalmente usadas para definir el planeamiento de la expansión centralizado no pueden usarse solas para definir la expansión en el nuevo ambiente y habrá que recurrir a herramientas suaves como Dinámica de Sistemas de manera complementaria. Se presentan algunas conclusiones y recomendaciones.

## 1. INTRODUCCION

El Sector Eléctrico Colombiano (SEC) ha entrado en una etapa de completa reestructuración pasando en pocos años de un esquema público centralizado obligatorio a un esquema abierto, de competencia en la generación, con participación pública y privada. El planeamiento de la expansión del SEC se ha visto afectado por este cambio en donde se ha pasado de la definición de un plan de expansión obligatorio de manera centralizada y a ser financiado completamente por el sector público, a un plan indicativo o de referencia cuyos proyectos podrían ser financiados por cualquier agente económico. Antes los proyectos tenían fechas de entrada definidas y se les garantizaba la colocación de su energía generada para la satisfacción de la demanda (en el sentido de que su fecha de entrada se asociaba a las necesidades de la demanda de energía). Ahora los proyectos son realizados por los diferentes agentes con la esperanza de tener unos costos de generación lo suficientemente bajos como para colocar toda la energía generada en el mercado y lograr unas ganancias (tasas de retorno) significativas.

Como se puede ver los cambios en el SEC son significativos, no es claro cómo evolucionará el sistema, ni tampoco cuál es el papel del Estado en este nuevo ambiente. Constitucionalmente el gobierno nacional tiene la obligación de garantizar la satisfacción adecuada de los servicios públicos básicos, dentro de los que se encuentra el abastecimiento de la energía eléctrica. En ese sentido se ha creado la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, que a través de la Superintendencia Delegada de Energía y Gas, tiene un papel fiscalizador del adecuado abastecimiento de la energía eléctrica. Por otra parte el Ministerio de Minas y Energía tiene la Unidad de Planeamiento Minero Energético (UPME) encargada de realizar un segui-

miento tanto a la oferta (plan indicativo) como al desarrollo de la demanda, para actuar en concordancia y garantizar el adecuado abastecimiento de la demanda.

Hace unos años el planeamiento de la expansión del SEC se hacía independiente de los otros sectores energéticos y su única consideración eran proyectos desde el punto de vista de la oferta energética. Hoy en día se pretende que proyectos de otros sectores energéticos (gas) y proyectos desde el punto de vista de la demanda hagan parte de la oferta energética disponible a los usuarios de energía eléctrica. Los proyectos de sustitución de energía eléctrica por gas entrarían a competir en el mercado y los proyectos desde el punto de vista de la demanda serían una opción adicional para los usuarios. Como se puede ver, grandes cambios se han presentado en el SEC y no es claro cómo deben considerarse para definir un nuevo esquema para el planeamiento de la expansión del mismo. Este trabajo pretende discutir algunos elementos que permitan realizar el análisis de la expansión del SEC en ambiente de competencia. Inicialmente se discute como se hacía el planeamiento de la expansión en el esquema centralizado y luego los elementos a tener en cuenta en el nuevo ambiente de competencia.

## 2. EXPANSION CENTRALIZADA

Durante años la expansión del SEC se realizó de manera centralizada, completamente financiado por el sector público y los planes tenían carácter de obligatorios. El propósito general del desarrollo del SEC era construir y operar un sistema de suministro que produjera de manera confiable la cantidad de energía y potencia de energía eléctrica deseada, las cuales debían poseer un nivel de calidad especificado. En este proceso, se debía hacer el mejor uso de los escasos recursos monetarios y de energía, procurando al mismo tiempo la protección del medio ambiente y el mejoramiento del nivel de vida. En la definición del plan de expansión siempre se aceptó que los beneficios para el país de disponer oportuna y confiablemente de las cantidades de energía eléctrica superaban grandemente a los respectivos costos. En este sentido el plan de expansión se definía entonces con el criterio de mínimo costo de tal manera que siempre se satisficiera la demanda con cierto grado de confiabilidad.

El problema de expansión planteado de esta manera podía ser escrito como un problema de optimización resuelto mediante el uso de ciertos algoritmos de optimización. La función objetiva minimiza costos totales (inversión y operación) actualizados y se considera todo tipo de restricciones como:

- Estructurales propias del sistema
- Satisfacción de la demanda con cierta confiabilidad
- Operacionales.
- Fecha más temprana de entrada de los proyectos.
- Disponibilidad de recursos.
- Otras.

En la solución de este problema hay varias complejidades que pueden introducirse al problema de expansión y aún se podría resolver con técnicas tradicionales de optimización como lo son:

- Selección de proyectos
- Definición de la capacidad de los proyectos
- Interdependencia
- Múltiples objetivos
- Aspectos de incertidumbre

Tal vez la complejidad más crítica es la de la interdependencia cuya consideración significa realizar la operación conjunta del sistema para definir la capacidad del nuevo proyecto que entra en la secuencia. Con respecto a la incertidumbre se define el plan de expansión que minimiza el valor esperado de los mínimos costos actualizados y al plan resultante se le hace análisis de sensibilidad con respecto a posibles condiciones críticas extremas indeseables.

En la solución de este problema se pueden usar diferentes algoritmos de optimización tales como:

- Programación Dinámica
- Programación Dinámica del Estado Embebido
- Programación Dinámica del Espacio Objetivo
- Programación Dinámica Heurística
- Programación Dinámica Dual
- Programación Lineal Entera Mixta con cortes Benders

Todas esas herramientas dan una solución apropiada al problema. Villegas, Smith y Mesa (1992) realizaron un análisis comparativo de esas metodologías para

solucionar el problema de expansión del SEC tal como se ha planteado acá, obteniéndose soluciones iguales para todas ellas pero existiendo diferencias sustanciales en el planeamiento del problema y en los tiempos de solución del mismo.

El resultado final del problema de expansión así planteado es una secuencia de proyectos con capacidades y fechas de entrada en operación específicas que satisfacen la demanda en todo el horizonte de planeamiento con cierta confiabilidad y que minimizan el valor esperado presente de los costos de inversión y operación.

Las herramientas usadas para solucionar este problema, algoritmos de optimización, se clasifican en el área de investigación de operaciones como herramientas "duras", en el sentido de que el problema tiene que cumplir con todas las condiciones impuestas por el algoritmo para encontrar la solución óptima (poca flexibilidad) y su incapacidad para representar aspectos llamados suaves como retroalimentaciones, retardos y otros.

### 3. NUEVO AMBIENTE DEL SECTOR ELECTRICICO

Cambios radicales se han presentado en el SEC a raíz de la promulgación de las nuevas leyes de servicios públicos domiciliarios y eléctrica. Con respecto a la expansión del SEC estos cambios se reflejan en los siguientes aspectos:

- Análisis de la expansión del SEC integrada con el sector energético nacional.
- Ambiente de competencia entre las empresas generadoras del SEC
- Participación del sector privado
- Plan de expansión es un plan de referencia, o indicativo
- Mandato constitucional de satisfacer de manera adecuada los requerimientos de servicios públicos básicos entre los que se encuentra la energía eléctrica.

La justificación gubernamental para estos cambios se basa en aspectos como:

- Lograr una mayor eficiencia en la atención del servicio, lo cual se debe reflejar finalmente en una disminución de costos para el usuario final.
- Disminuir el tamaño del estado, del sector público.
- Menores inversiones del Sector Público en el SEC y una mayor disponibilidad para inversiones en otros sectores de mayor contenido social.

A nivel institucional los cambios han sido los siguientes:

- El análisis del desarrollo del SEC, su visión integrada dentro del sector energético nacional y la definición del plan de expansión indicativo o de referencia corresponde al Ministerio de Minas y Energía por medio de su Unidad de Planeamiento Minero Energético.
- La regulación del SEC corresponde a la CREG, Comisión Reguladora de Energía y Gas, quien debe regular de tal manera que se garantice un ambiente de competencia lo más transparente posible, con claridad de precios, y al mismo tiempo garantizando que el sistema evolucione con la confiabilidad deseada.
- La fiscalización del desarrollo del SEC y de la atención adecuada del servicio en todos sus aspectos corresponde a la Superintendencia de Servicios Públicos por medio de la Superintendencia Delegada de Energía y Gas.

El problema de expansión no es entonces el problema centralizado presentado en la sección anterior que podía ser planteado claramente como un problema de optimización y resuelto usando algún algoritmo de optimización tradicional. En el nuevo ambiente del SEC el problema de expansión debe considerar aspectos como:

- Competencia entre los generadores.
- Estructura financiera de una posible participación privada (altas tasas de retorno y cortos períodos de recuperación).
- Manejo de la confiabilidad vía estímulos a los generadores para que mantengan un margen de reserva adecuado.
- Nivel de información entre los generadores.

- Percepción del usuario para aceptar alternativas sustitutas de la energía eléctrica o proyectos desde el punto de vista de la demanda.
- Adecuada regulación que evite manipulaciones por parte de los generadores para su propio beneficio.
- Retiro de plantas generadoras.
- Percepción del desarrollo futuro del SEC que tiene cada empresa generadora.
- Estructura financiera que las empresas generadoras aceptarían para nuevos desarrollos en ambiente de competencia (menos riesgos).
- Disponibilidad de combustibles.

Obviamente que algunas consideraciones del problema de expansión tal como se planteó en la sección anterior se continuarían considerando en ese problema en el nuevo ambiente del SEC. Consideraciones como las restricciones estructurales del sistema, restricciones operativas, fecha más temprana de entrada en operación de los proyectos, operación conjunta de los proyectos y algunas otras, serían incluidas en el nuevo problema de expansión.

En este nuevo esquema de análisis de la expansión es de primordial importancia tener una transparencia absoluta en la estructura tarifaria, que permita analizar la verdadera potencialidad de penetración de energéticos alternativos (gas) y de proyectos desde el punto de vista de la demanda.

El problema de expansión planteado dentro del nuevo ambiente del SEC no pareciera poder resolverse mediante el uso de algoritmos de optimización duros como los que se usaron para resolver este problema en el anterior esquema del SEC. Se requieren ahora algoritmos o metodologías "suaves" para representar este problema como la Dinámica de Sistemas, Teoría de Juegos o Simulaciones.

#### 4. APROXIMACION AL PROBLEMA DE EXPANSION

Una primera inquietud con respecto al problema de expansión del SEC en el nuevo ambiente es ¿para qué analizar la expansión del SEC? No se supone que las fuerzas del mercado orientarán el desarrollo futuro del

SEC? Se requiere analizar la expansión cuando lo que se quiere es estimular un ambiente de competencia? A pesar de esos interrogantes se piensa que se requieren herramientas que permitan analizar cómo evolucionará el SEC de tal manera que:

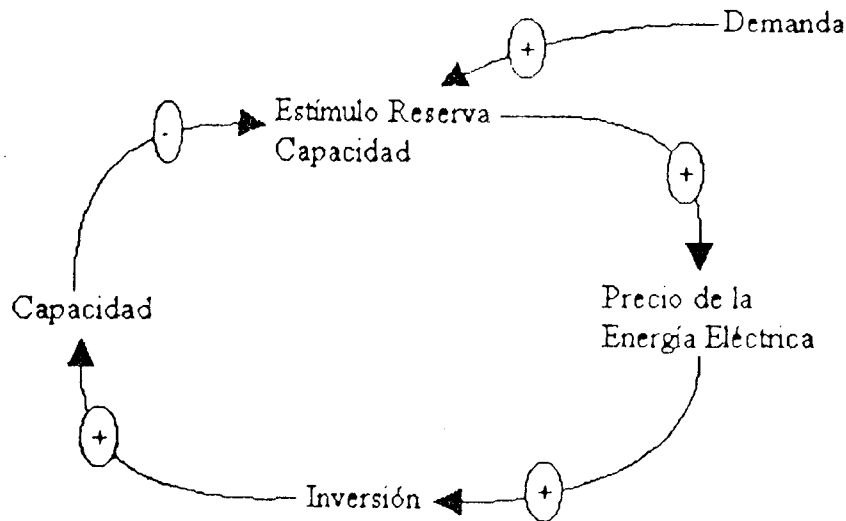
- Se haga un seguimiento adecuado de esa evolución de tal manera que el Estado pueda actuar oportunamente, en caso de ser necesario, y cumplir con el mandato constitucional de garantizar el abastecimiento cabal de la energía eléctrica.
- Se pueda estudiar el efecto de ciertas regulaciones sobre esa evolución.
- Se pueda estudiar el efecto de ciertas políticas del estado (tarifas, proyectos desde el punto de vista de la demanda y otros) sobre esa evolución.

Más que definir un plan de expansión lo que se trata es de desarrollar herramientas que permitan entender o analizar cómo evolucionará el SEC en el futuro, bajo el nuevo ambiente en que se encuentra. Ambiente que entre otras cosas corresponde claramente a un mercado imperfecto, al cual no se le puede pretender aplicar las consideraciones de un mercado perfecto en libre competencia.

El análisis del desarrollo de sistemas de generación en ambiente de competencia ha sido realizado usando Dinámica de Sistemas (Bunn y Larsen, 1992; Bunn, Larsen y Vlahos, 1993; Bunn, 1993). Esos trabajos han sido realizados para evaluar la nueva estructura de privatización del sistema de Gran Bretaña, y aunque existen grandes diferencias con el sistema colombiano, algunas enseñanzas son posibles de extraer para aplicarlas a nuestro caso.

En la Figura 1 se muestra lo que sería el diagrama causal del SEC en el nuevo ambiente de competencia. A mayor precio de la energía eléctrica hay más estímulo para la inversión y por lo tanto más desarrollo de capacidad y no es necesario estimular ninguna reserva adicional de capacidad. Por otra parte, con el aumento de la demanda el margen de capacidad disminuye y se requiere estimular el incremento de reserva de capacidad lo cual incrementa el precio de la energía eléctrica

Figura 1. Diagrama Causal de la Evolución de la Capacidad de Generación en Ambiente de Competencia.



Se discuten ahora algunos de los elementos a considerar en el estudio de la evolución futura de sistemas de generación en ambiente de competencia:

1. En el corto plazo, nuevos inversionistas en capacidad entran al sistema atraídos por la posibilidad de incluir plantas que esperan generar consistentemente con costos inferiores al precio marginal del sistema, especialmente en un sistema con plantas de generación muy ineficientes. Se espera que esta situación sea muy determinante en el corto plazo, pero en el mediano y largo plazo se esperaría que todos los generadores se vuelvan competitivos y el precio marginal del sistema deja de ser una señal adecuada para estimular la expansión en capacidad. Inclusive en el largo plazo el precio marginal del sistema podría estimular la inversión en capacidad si existe una variabilidad en los precios esperados de combustible (costos de generación), pero si hay competencia entre los abastecedores de combustible los costos de generación serán similares en el largo plazo, y tampoco los precios marginales del sistema estimularían la inversión en capacidad por esta situación.
2. Se requiere entonces un estímulo para la inversión en capacidad que refleje tanto la pérdida del mar-

gen de reserva como el precio que los usuarios están dispuestos a pagar para evitar la pérdida del margen de reserva como el precio que los usuarios están dispuestos a pagar para evitar la pérdida de abastecimiento. Este estímulo lo reciben los generadores además del precio marginal del sistema. La decisión de inversión en capacidad de un generador se basará en la comparación del costo de capital descontado (con la tasa de descuento requerida) de la nueva planta con el estímulo para inversión en capacidad que recibe el generador. El estímulo para inversión en capacidad puede ser manipulado por el ente regulador (CREG) para incentivar inversiones marginales en nueva capacidad y al mismo tiempo debe tener cuidado que no sea manipulado por los generadores que ya están en el mercado para tratar de evitar la entrada de nuevos competidores.

3. En un ambiente de competencia los competidores tienden a tomar decisiones de bajo riesgo que en general se traducen en escoger proyectos con altas tasas de retorno y períodos cortos de recuperación de la inversión. Esto es bastante claro en el caso de la participación privada y se espera que sea igualmente asumido por las empresas públicas que ya están en el mercado. Inclusive esas condiciones

financieras exigidas a los proyectos dependerán también de la situación de riesgo en que se encuentre el generador como su participación en el mercado o el porcentaje de capacidad total en construcción. Mientras mayor sea su situación de riesgo más exigente será en las condiciones financieras para aceptar hacer un nuevo proyecto.

4. Con un esquema de precios de la energía eléctrica formado por el precio marginal del sistema y el estímulo para inversión en capacidad, se esperaría que el sistema evolucione con ciclos de sobre y subinstalación en la capacidad de generación. Estímulos altos para inversión en capacidad llevan a los generadores a esa inversión produciéndose una sobre instalación en capacidad, lo cual hace que el estímulo desaparezca y los generadores se abstengan de hacer nuevas inversiones en capacidad produciéndose una subinstalación en capacidad, haciendo de nuevo aumentar el estímulo y generándose un nuevo ciclo de sobre y subinstalación. Estos ciclos ocurrirán en mayor o menor grado dependiendo de:

- El grado de conocimiento de la competencia.
- El conocimiento del futuro, que tanto en el futuro se conoce el estímulo de inversión en capacidad.
- El estímulo de inversión en capacidad.
- La incertidumbre en la demanda.
- Período de construcción de las plantas generadoras.

5. En la evolución futura del SEC se espera que tenga una importante componente de generación térmica, y en el análisis de esa evolución hay que considerar el retiro de plantas de generación. Este retiro se puede deber a obsolescencia o a la entrada de tecnologías más eficientes. Se debe también considerar que el costo de extender la vida de una planta existente es de todas maneras más económico que construir una planta de generación nueva. Estas consideraciones pueden llevar a sub o sobre estimaciones de las tasas de retiro de las plantas de generación.

6. Para los generadores será muy importante su capacidad de predecir la evolución futura del siste-

ma, es decir, su capacidad para predecir el comportamiento del estímulo de inversión en capacidad. En el caso de no tenerse ninguna capacidad de predicción las decisiones de inversión responden a señales de precios inmediatas, mientras que cuando se tiene cierta capacidad de predicción, los cálculos de inversión se basan en proyecciones de la demanda y en la percepción de cómo evolucionará la capacidad del sistema.

7. Las proyecciones de la demanda son inciertas y es necesario involucrar elementos que representen esa incertidumbre en el cálculo de la demanda. Esto se puede hacer considerando una distribución de probabilidades para la demanda de donde se hacen muestreos o incluyendo términos aleatorios de errores en el cálculo de la demanda, lo cual corresponde más al análisis de sensibilidad.

8. En la percepción que cada generador tenga de cómo evolucionará la capacidad del sistema es muy importante su conocimiento sobre la intención del competidor de construir nueva capacidad de generación, retirar plantas o de extender la vida de algunas plantas. Esto se puede representar por la capacidad del competidor para la construcción o retiro de plantas en el futuro. Algo que ayuda mucho a esa percepción es el conocimiento de los proyectos en construcción del competidor. Si un competidor decide realizar una planta hidroeléctrica se sabe que en los próximos 10 años sus mayores esfuerzos se concentrarán en esa planta. También ayuda en esa percepción de conocer la situación del competidor, su posible posición ante el riesgo en inversiones, sus posibles exigencias financieras para nuevos proyectos, etc.

9. La disponibilidad y precio de combustibles jugará un papel predominante en la evolución del SEC. En el corto plazo puede haber un estímulo con el precio marginal del sistema para que entren plantas de combustible más económicas, pero en el largo plazo todas las plantas evolucionarán hacia ese tipo de combustibles y ese estímulo desaparecerá. Muy importante en esa transición es establecer también competencia a nivel de abastecedores de combustible manejando una política transparente en los precios de los diferentes combustibles.

10. La percepción del usuario sobre las nuevas alternativas que se le ofrecen es muy importante y decidirá el éxito de la penetración de esas alternativas. En estudios de penetración de gas en Estados Unidos se ha concluido que para que este energético sea realmente considerado por los usuarios actuales de energía eléctrica tiene que dar tasas de retorno mayores (dos o tres veces más) que las que da la energía eléctrica. En Gran Bretaña la penetración del gas como sustituto de energía eléctrica en cocción y calentamiento ha tomado cerca de 25 años y todavía no es completa, a pesar de ser un excelente negocio cuando se compara con la energía eléctrica. Los proyectos desde el punto de vista de la demanda tendrán éxito sólo en el caso que se manejen esquemas tarifarios claros y transparentes sin ningún tipo de subsidio y el proyecto propuesto represente ahorros significativos para los usuarios, no ahorros marginales. Es claro entonces que el éxito de las nuevas alternativas energéticas será posible sólo cuando el usuario final perciba claramente retornos importantes para él, no sólo que es mejor o es un buen negocio. Tiene que ser un muy buen negocio.

11. Uno de los aspectos importantes a considerar en la evolución del SEC es la operación conjunta de los proyectos hidroeléctricos, lo cual representa una mayor disponibilidad para el sistema que si se operan sus componentes individualmente. Estos beneficios se presentan debido a aprovechamientos ubicados en un mismo río (en cadena) o por complementariedad hidrológica. Se esperaría que en aprovechamientos en cadena las diversas empresas generadoras con proyectos en la cadena lleguen a acuerdos, pues habría un beneficio adicional para todas. En el caso de complementariedad hidrológica es más difícil de definir y analizar, pero habiendo un beneficio adicional de por medio se espera también que los generadores involucrados lleguen a un acuerdo.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base a lo discutido anteriormente, se presentan a continuación algunas conclusiones y recomendaciones:

- Es importante que el sector energético nacional tenga herramientas que le permitan analizar cómo evolucionará el SEC en el nuevo ambiente de competencia y el efecto de políticas regulatorias o de otro tipo sobre esa evolución.
- Las herramientas duras de optimización tradicionales no parecieran adecuadas para modelar la evolución del SEC en el nuevo ambiente de competencia, requiriéndose el uso de herramientas suaves de investigación de operaciones como la Dinámica de Sistemas o combinaciones de estos dos grupos de metodologías de manera complementaria.
- La regulación del sector debe no sólo garantizar el ambiente de competencia, sino que también debe dar señales de precio adecuadas para que el SEC mantenga un nivel de confiabilidad adecuado.
- Hay todo un conjunto nuevo de elementos a considerar en el estudio de la evolución del SEC que deben ser claramente discutidos y modelados de manera adecuada.
- Se requiere un conocimiento claro y un diseño transparente del esquema tarifario de los diferentes energéticos de tal manera que se pueda analizar las verdaderas potencialidades de alternativas energéticas para el SEC. Un aspecto clave en este punto es la percepción del usuario final sobre esas alternativas.
- El precio marginal del sistema de generación no es una señal adecuada para estimular nuevas inversiones en capacidad y se requiere una componente adicional en el precio que realmente haga ese estímulo.
- Si los generadores no tienen en cuenta consideraciones de conocimiento del sistema, si no hacen un esfuerzo por conocer la competencia y cómo evolucionará el sistema, la evolución del SEC presentará ciclos de sobre y subinstalaciones de capacidad.
- En términos generales el ambiente de competencia hará que los generadores exijan condiciones financieras cada vez menos riesgosas a los nuevos proyectos para decidir invertir en capacidad.

- Ya no se habla de plan de expansión del SEC sino del análisis de la evolución del SEC.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Este artículo fue elaborado dentro del proyecto "Desarrollo de una metodología basada en dinámica de sistemas para el análisis de políticas del sector energético" para la Unidad de Planeamiento Minero Energético, del Ministerio de Minas y Energía. Igualmente se agradece a COLCIENCIAS por el financiamiento del proyecto "Planeamiento Integrado de la Expansión de Sistemas Hidrotérmicos Interconectados de Generación de Energía Eléctrica".

## 7. REFERENCIAS

- Bunn D. W. y Larsen E.R., 1992. Sensitivity of reserve margin to factors influencing investment behaviour in the electricity market of England and Wales. *Energy Policy*, mayo de 1992, pp. 420-429.
- Bunn D. W., Larsen E.R. y Vlahos K., 1993. Complementary modelling approaches for analysing several effects of privatization on electricity investment. *Journal Oper. Res. Soc.*, Vol. 44, No. 10, pp. 957-971.
- Bunn D. W., 1994. Evaluating the effects of privatizing electricity. *Journal Oper. Res. Soc.*, Vol. 45, No. 4, pp. 367-375.
- Villegas A. M., Smith R. A. y Mesa O.J., 1992. Estudio de las técnicas para el análisis de la expansión de sistemas hidrotérmicos de generación. *Revista ENERGETICA*, No. 8, pp. 37-49.