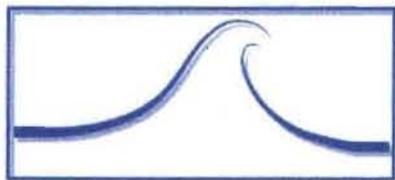


MICROMUNDO PARA LA INVERSIÓN EN GENERACIÓN ELÉCTRICA EN COLOMBIA

TÉSIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE MÁGISTER EN APROVECHAMIENTO DE RECURSOS HIDRÁULICOS

Por:
SANTIAGO ARANGO ARAMBURO I.C.

Asesor:
Ricardo Smith Quintero I.C., M.Sc., Ph.D.



POSGRADO EN APROVECHAMIENTO DE RECURSOS HIDRÁULICOS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
Facultad Nacional de Minas
Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos
Medellín

Diciembre de 2000

UNAL-Medellín



6 4000 00114870 2



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
DEPARTAMENTO DE BIBLIOTECA Y DOCUMENTACIÓN
BIBLIOTECA FACULTAD DE MINAS

1951
2000

A mi mamá, mis hermanos y a mi novia
A todos ellos por todo su amor

DONDE HAY PAZ, HAY AMOR
DONDE HAY AMOR, ESTÁ DIOS
DONDE ESTÁ DIOS, NO FALTA NADA

AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar sus agradecimientos:

- Los profesores Dr. Ricardo Smith y Dr. Isaac Dyner, por todos los conocimientos que me han aportado, en particular, para la realización de esta tesis.
- A Santiago Montoya y Silvia Osorio, ya que sus conocimientos se reflejan de diferentes maneras en este trabajo.
- A los proyectos “Opciones de manejo del recurso hidroeléctrico en Colombia” financiado por COLCIENCIAS e ISA, y “ENERBIZ, micromundo para comercialización de energía en Colombia” financiado por ISA. Algunos de los conocimientos generados en estos se aplican a este trabajo.
- A los compañeros de posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, por su valiosa amistad
- A todos ellos que de una u otra manera me aportaron para poder llevar a cabo esta tesis.

RESUMEN

El Sector Eléctrico Colombiano ha pasado de tener un esquema centralizado a un esquema de mercado fundamentado en la Ley de Servicios Públicos Domiciliarios (Ley 142 de 1994) y en la Ley Eléctrica (Ley 143 de 1994). Estas condiciones de mercado, generan nuevos riesgos e incertidumbres para todos los agentes que en este participan, en particular para los inversionistas en nueva generación.

La imposibilidad de pronosticar a largo plazo y la necesidad de un adecuado manejo del riesgo y de la incertidumbre hacen que se requiera que los agentes aprendan sobre el mercado y sobre las implicaciones que tienen al invertir en este. Por este motivo se desarrolló un micromundo o simulador para inversión en generación para Colombia, que permite un aprendizaje en estos aspectos.

El micromundo desarrollado, está soportado en un modelo en Dinámica de Sistemas, donde el usuario toma sus decisiones de inversión en nueva capacidad de generación y observa, además del desempeño de su inversión, el comportamiento de algunas de las variables más representativas del sector eléctrico. Con este, el usuario puede aprender sobre el efecto de la hidrología en su inversión, que pasa cuando hace un apalancamiento de la deuda y analizar casos particulares, entre otros.

Este trabajo, además de la herramienta como tal, presenta aplicaciones a tres tecnologías de generación de electricidad y se analiza el comportamiento del sistema ante tres diferentes escenarios.

ABSTRACT

The electricity sector in Colombia has changed from a central scheme to a market scheme, based in en “Ley de Servicios Públicos Domiciliarios (Ley 142 de 1994)” and “Ley Eléctrica (Ley 143 de 1994)”. These new market conditions, make risk and uncertain to all the participants agents, particularly investors in new generation.

Due that it is impossible a long term forecast and the needy of a good risk and uncertain management, the agents require to learn about the market and the implications implicit if you invest in it. We these arguments, we create a microworld or simulator which permits learning about these aspects.

The microworld is supported in a System Dynamics model, where the user makes his investment decision and see the performance of it and the behavior of the some of the more representative variables of the electricity sector en Colombia. The user can learn about the effect of the hydrology in your investment, what happen if you have a bank which lend you money to finance part of the project, etc.

We present a tool, the microworld, and three applications to different technologies of electricity generation, and the analysis of the behavior of the system with different scenarios.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	7
2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y ASPECTOS METODOLÓGICOS.....	11
2.1	EL PROBLEMA DE INVERSIÓN.....	11
2.2	RIESGOS E INCENTIVOS A LA INVERSIÓN EN GENERACIÓN.....	13
2.3	COMPLEJIDAD DE LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS.....	15
2.4	ANÁLISIS METODOLÓGICO.....	16
3	MODELO DE SIMULACIÓN EN DINÁMICA DE SISTEMAS.....	24
3.1	ESQUEMA GENERAL.....	25
3.2	MERCADO.....	27
3.3	EXPANSIÓN.....	30
3.3.1	<i>Proceso de expansión.....</i>	<i>33</i>
3.3.2	<i>Criterio de Mínimo Costo Unitario Instalado y Margen de Capacidad.....</i>	<i>33</i>
3.3.3	<i>Criterio de Precio Crítico y Precio Esperado.....</i>	<i>34</i>
3.4	HIDROLOGÍA.....	38
3.4.1	<i>Modelo de aportes de energía a las centrales hidráulicas.....</i>	<i>39</i>
3.4.2	<i>Ajuste continuo del modelo hidrológico con la entrada de proyectos.....</i>	<i>40</i>
3.4.3	<i>Estimación de modelos, análisis de la información y validación.....</i>	<i>41</i>
3.4.4	<i>Diseño de Escenarios hidrológicos.....</i>	<i>44</i>
3.5	DEMANDA.....	45
3.6	MÓDULO FINANCIERO.....	46
3.6.1	<i>Decisiones de Inversión.....</i>	<i>47</i>
3.6.2	<i>Flujo de fondos del proyecto antes de impuestos.....</i>	<i>48</i>
3.6.3	<i>Flujo de fondos del proyecto después de impuestos.....</i>	<i>49</i>
3.6.4	<i>Flujo de fondos del inversionista.....</i>	<i>49</i>
3.6.5	<i>Indicadores Económicos.....</i>	<i>51</i>
3.7	VALIDACIÓN.....	52

4	MICROMUNDO DE INVERSIÓN EN GENERACIÓN EN EL SEC	56
4.1	PLATAFORMA DE ANÁLISIS DE INVERSIONES.....	57
4.1.1	<i>Condiciones de modelamiento.....</i>	59
4.1.2	<i>Decisiones de inversión.....</i>	61
4.1.3	<i>Indicadores del proyecto.....</i>	63
4.1.4	<i>Estado del sistema.....</i>	64
4.1.5	<i>Descripción del modelo.....</i>	65
4.1.6	<i>Avanzar 15 años y Reset.....</i>	65
4.2	MICROMUNDO PARA INVERSIÓN EN EL SEC.....	65
4.2.1	<i>Cambios en algunos componentes de la plataforma de análisis.....</i>	66
4.2.2	<i>Decisiones periódicas.....</i>	66
4.3	USO Y APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA.....	67
4.3.1	<i>Uso del micromundo en un taller de capacitación.....</i>	67
4.3.2	<i>Una sesión usando el micromundo.....</i>	68
4.3.3	<i>Requerimientos técnicos.....</i>	68
5	APLICACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	70
5.1	ESCENARIOS DE ANÁLISIS Y COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA.....	71
5.1.1	<i>Caso base.....</i>	71
5.1.2	<i>Escenario A.....</i>	75
5.1.3	<i>Escenario B.....</i>	78
5.2	PROYECTO HIDROELÉCTRICO: NECHÍ “A”.....	81
5.2.1	<i>Características del proyecto.....</i>	81
5.2.2	<i>Evaluación del proyecto con la plataforma de análisis.....</i>	84
5.3	PROYECTO TÉRMICA A CARBÓN: TIBITÁ.....	88
5.3.1	<i>Características del proyecto.....</i>	88
5.3.2	<i>Evaluación del proyecto con la plataforma de análisis.....</i>	92
5.4	PROYECTO TÉRMICO A GAS: PLANTA CICLO COMBINADO.....	96
5.4.1	<i>Características del proyecto.....</i>	96
5.4.2	<i>Evaluación del proyecto con el micromundo de inversión en el SEC.....</i>	97
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	100
7	REFERENCIAS.....	104

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Micromundos en la toma de decisiones</i>	22
<i>Figura 2. Representación esquemática del análisis general de un sistema (Dyner, 2000)</i>	23
<i>Figura 3. Dinámica del mercado de energía eléctrica en Colombia</i>	25
<i>Figura 4. Estructura modular del modelo en DS</i>	26
<i>Figura 5. Formación del precio de bolsa</i>	28
<i>Figura 6. Curva de oferta por tecnología en un año normal (y niña) en mes de verano.</i>	29
<i>Figura 7. Dinámica de la capacidad de generación del SEC</i>	32
<i>Figura 8. Esquema funcional de formación del precio esperado</i>	35
<i>Figura 9. Distribución por tecnologías del Cargo por Capacidad</i>	36
<i>Figura 10. Factor de margen en capacidad para estimar el precio esperado</i>	37
<i>Figura 11. Serie de SOI y promedio móvil de 5 años</i>	41
<i>Figura 12. Medias mensual multianual, Serie HE</i>	42
<i>Figura 13. Aportes a la tecnología HE, estimados y observados</i>	43
<i>Figura 14. Aportes a la tecnología HF</i>	44
<i>Figura 15. Aportes a la tecnología HF, estimados y observados</i>	44
<i>Figura 16. Escenario hidrológico 1: valores de 0 para ocurrencias de El Niño y 1 para el resto de eventos.</i>	45
<i>Figura 17. Escenarios de proyección de la demanda</i>	46
<i>Figura 18. Flujo de fondos genérico de un proyecto y endeudamiento</i>	50
<i>Figura 19. Flujo de fondos genérico de un proyecto y del inversionista</i>	51
<i>Figura 20. Generación hidráulica modelada y real</i>	53
<i>Figura 21. Generación térmica modelada y real</i>	53
<i>Figura 22. Precio de bolsa modelado y real</i>	54
<i>Figura 23. Reservas hídricas modelada y real</i>	55
<i>Figura 24. Pantalla de entrada al micromundo</i>	57
<i>Figura 25. Condiciones de modelamiento de la plataforma de análisis de inversión.</i>	59
<i>Figura 26. Pantalla de modificación de datos del banco de proyectos.</i>	60
<i>Figura 27. Pantalla de entrada (izquierda) y salida (derecha) de proyectos al inventario.</i>	60

Figura 28. Escenarios de ocurrencia del fenómeno de El Niño.	61
Figura 29. Decisiones de inversión en generación de electricidad en la plataforma de análisis.	62
Figura 30. Costos del proyecto de generación en la plataforma de análisis	63
Figura 31. Indicadores financieros como resultado de una inversión.	64
Figura 32. Decisiones semestrales del micromundo de inversión en el SEC.	67
Figura 33. Ocurrencia del fenómeno El Niño y aportes agregados al sistema. Caso base.	72
Figura 34. Precio de bolsa y precio de contratos, mensual y promedio total. Caso base.	73
Figura 35. Demanda Vs Capacidad instalada y margen en capacidad. Caso base.	73
Figura 36. Composición tecnológica del sistema, en capacidad y en porcentaje. Caso base.	74
Figura 37. Entrada de proyectos de generación de electricidad. Caso base.	74
Figura 38. Volatilidad de los precios de bolsa. Caso base.	75
Figura 39. Precio de bolsa mensual y promedio total. Escenario A.	76
Figura 40. Demanda Vs Capacidad instalada y margen en capacidad. Escenario A.	77
Figura 41. Volatilidad de los precios de bolsa. Escenario A.	77
Figura 42. Ocurrencia del fenómeno El Niño y aportes agregados al sistema. Esc B.	79
Figura 43. Demanda Vs Capacidad instalada y margen en capacidad. Escenario B.	79
Figura 44. Composición tecnológica del sistema, en capacidad y en porcentaje. Escenario B.	80
Figura 45. Demanda Vs Capacidad instalada y margen en capacidad. Escenario B.	80
Figura 46. Indicadores financieros, proyecto Nechí "A". Caso Base.	85
Figura 47. Flujo de fondos proyecto Nechí "A" después de impuestos. Caso base.	86
Figura 48. Flujo de fondos del inversionista del proyecto Nechí "A" después de impuestos. Caso base.	86
Figura 49. Indicadores financieros, proyecto Nechí "A". Escenario A.	87
Figura 50. Flujo de fondos del inversionista del proyecto Nechí "A" después de impuestos. Escenario A.	87
Figura 51. Indicadores financieros, proyecto Nechí "A". Escenario B.	88
Figura 52. Indicadores financieros, proyecto Tibitá. Caso Base.	92
Figura 53. Flujo de fondos proyecto Tibitá después de impuestos. Caso base.	93
Figura 54. Flujo de fondos del inversionista del proyecto Tibitá después de impuestos. Caso base.	94
Figura 55. Indicadores financieros, proyecto Tibitá. Escenario A.	94
Figura 56. Flujo de fondos del inversionista del proyecto Tibitá después de impuestos. Escenario A.	95
Figura 57. Indicadores financieros, proyecto Tibitá. Escenario B.	95
Figura 58. Indicadores financieros, proyecto térmico a Gas Ciclo – Combinado en el Magdalena Medio de 150 MW, mediante el uso del micromundo.	98
Figura 59. Flujo de fondos del inversionista después de impuestos, proyecto térmico a Gas Ciclo – Combinado en el Magdalena Medio de 150 MW, mediante el uso del micromundo.	98
Figura 60. Precio de Bolsa con una corrida en el micromundo.	99

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Factor de Cargo por Capacidad, F_c, para estimar el precio esperado</i>	37
<i>Tabla 2. Factor hidrología, F_h, para estimar el precio esperado</i>	38
<i>Tabla 3. Construcción de escenarios de proyección de la demanda de energía eléctrica.</i>	45
<i>Tabla 4. Cuantificación del error del modelo Vs real</i>	55
<i>Tabla 5. Características principales del proyecto "NECHÍ A"</i>	82
<i>Tabla 6. Presupuesto integrado, proyecto hidroeléctrico "NECHÍ A"</i>	82
<i>Tabla 7. Programa de desembolsos del proyecto hidroeléctrico "NECHÍ A"</i>	83
<i>Tabla 8. Flujo de Costos del proyecto hidroeléctrico "NECHÍ A"</i>	84
<i>Tabla 9. Características principales del proyecto "TIBITÁ"</i>	90
<i>Tabla 10. Presupuesto integrado, proyecto termoeléctrico "TIBITÁ"</i>	91
<i>Tabla 11. Programa de desembolsos del proyecto termoeléctrico "TIBITÁ"</i>	91
<i>Tabla 12. Flujo de Costos del proyecto térmico a carbón "TIBITÁ"</i>	92
<i>Tabla 13. Información principal, proyecto termoeléctrico a gas-ciclo combinado.</i>	96

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. CURVAS DE OFERTA PARA EL SECTOR ELÉCTRICO COLOMBIANO (1996 – 1999)

ANEXO 2. INVENTARIO DE PROYECTOS

*ANEXO 3. CÁLCULO DEL PRECIO CRÍTICO, P**

ANEXO 4. ESCENARIOS HIDROLÓGICOS

ANEXO 5. PLATAFORMA DE ANÁLISIS

ANEXO 6. MICROMUNDO PARA LA INVERSIÓN EN GENERACIÓN ELÉCTRICO EN COLOMBIA

1 INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

La última década ha sido de profundas transformaciones en los esquemas de manejo de los sectores energéticos, particularmente la electricidad, pasando de la planeación centralizada a los mercados libres buscando eficiencia y mejor uso de los recursos. En particular, el Sector Eléctrico Colombiano -SEC- ha fundamentado sus cambios en la Ley de Servicios Públicos Domiciliarios (Ley 142 de 1994) y en la Ley Eléctrica (Ley 143 de 1994). El SEC pasó de ser un esquema centralizado a un esquema de mercado, el cual cuenta con la Bolsa de Energía instaurada en el año de 1995.

Bajo estas condiciones de mercado libre, se requiere que los agentes participantes en el SEC (entre ellos los inversionistas) conozcan el riesgo y las incertidumbres a las que están sometidos para la adecuada toma de decisiones. Con el esquema de planificación centralizada se tenía pleno conocimiento de las condiciones de los sistemas energéticos, partiendo de una función objetivo claramente identificada; pero con el cambio a modelos de mercado han aparecido nuevos elementos. Con la evolución del mercado se ha introducido la competencia en las diferentes actividades de los sistemas energéticos, lo que implicó un aumento en la complejidades de dichos sistemas.

Los sistemas eléctricos, entre ellos el colombiano, están caracterizados por su incertidumbre en muchos aspectos, entre otros: en el precio de la energía, ya que este se forma de las ofertas entre los agentes generadores; los continuos cambios y ajustes en la regulación; el desarrollo tecnológico, ya que es posible que nuevas tecnologías desplacen a otras en un período de tiempo no determinado.

Además, la competencia por una porción de mercado y la búsqueda de la eficiencia energética hacen que se generen nuevos comportamientos de consumos no conocidos, aspectos como cambios en la elasticidad al precio, como “aplanar” la curva de carga y la penetración masiva de sustitutos, entre otros.

En este nuevo ambiente, la evaluación financiera tradicional de los proyectos de inversión en capacidad de generación tiene dificultades, particularmente en la evaluación de los beneficios del proyecto debido a todas las incertidumbres al respecto. Ante esto, se ha venido trabajando en nuevas metodologías que buscan básicamente opciones de invertir, es decir, se mira el problema de la inversión como una oportunidad en el tiempo. Estas metodologías aún están en proceso de desarrollo.

Con la necesidad de desarrollar los sistemas y estar soportados en herramientas teóricas que sirvan de apoyo a las decisiones, se continúan utilizando algunas metodologías del anterior sistema centralizado, las cuales no se ajustan a un ambiente de incertidumbre como el actual, ya que fueron creadas para operar bajo otro esquema. Además otro tipo de herramientas se han implementado en el sector, tales como árboles de decisiones, simulación y opciones de inversión; pero que fueron desarrolladas para entornos con ninguno o poca componente hidráulica, presentándose dificultades en su implantación para Colombia.

Bajo las anteriores circunstancias, se requiere de nuevas herramientas que permitan entender el comportamiento del sistema en su nueva estructura de mercado, adaptadas explícitamente para el caso particular de Colombia, y que sirvan para responder preguntas de tipo ¿qué pasa si ...? Metodologías como la simulación y el uso de micromundos para el aprendizaje han sido aplicadas para con el ánimo de satisfacer los nuevos requerimientos; particularmente en Colombia se desarrolló un micromundo para comercialización de energía en Colombia.

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un Micromundo o Simulador para inversión en generación para el Mercado Eléctrico Colombiano, soportado en un modelo de simulación de mercados que permita entender la dinámica de los mismos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Especificar un Micromundo para inversión en generación en el SEC, soportado en un modelo de toma de decisiones y de simulación en Dinámica de Sistemas.
- Construir un modelo en Dinámica de Sistemas que retome los elementos más importantes de las experiencias presentadas en la literatura; en particular se busca aprovechar los trabajos realizados por Montoya (1997) y algunos proyectos del Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos tales como: “Opciones de Manejo del Recurso Hidroeléctrico en el SEC” (ISA-UNAL-COLCIECIAS, 1999-2000), “Plataforma en Dinámica de Sistemas para Analizar Posibilidades de Inversión en Generación Eléctrica” (INTEGRAL-UNAL-COLCIENCIAS, 1998-1999), y proyecto “Micromundo para Comercialización de Energía en el Mercado Eléctrico Colombiano” (ISA – UN, 2000). Se retoman elementos de modelación de la inversión en generación en el SEC con los ajustes y cambios que se consideran necesarios.
- Permitir en el Micromundo una funcionalidad tal que el usuario pueda modificar diferentes parámetros y tomar decisiones de inversión para observar cómo evoluciona el sistema y evaluar el desempeño de sus decisiones.
- Crear una herramienta de aprendizaje –Micromundo– que responda a preguntas de tipo ¿Qué pasa si ...?, dirigida a inversionistas en generación y demás personas interesadas en la industria eléctrica colombiana. La herramienta será un juego donde el usuario tome decisiones periódicas, la cual tiene una forma abreviada de uso mediante una plataforma de análisis que permite la evaluación de inversión particular.

APORTE

En el Marco Regulatorio actual del Mercado Eléctrico Colombiano, en el cual se fomenta la competencia y se crea un gran dinamismo con las correspondientes incertidumbres de la industria eléctrica, se observa el requerimiento de herramientas para el análisis y para el aprendizaje. Dado que los instrumentos para tales requerimientos son pocos, esta tesis realiza un aporte en el sentido

de ser una herramienta de análisis y de aprendizaje, que puede permitir entender mejor el Mercado Eléctrico Colombiano.

En el ambiente de competencia generado, se crean oportunidades para inversión en generación en el SEC. Para estos agentes (potenciales usuarios) es útil la herramienta desarrollada. Además, por medio del micromundo, se analizan casos de futuras inversiones que pueden ser propuestas.

CONTENIDO

El aporte principal del trabajo es la concepción del micromundo para inversión en generación en el SEC. El micromundo está soportado en un modelo en Dinámica de Sistemas el cual agrega conocimiento adicional al adquirido en estudios realizados después de la liberalización del mercado. El modelo tiene en cuenta conceptos físicos del sistema y conceptos económicos que hacen de éste un modelo rico en teoría. Con el modelo realizado, se puede apoyar la toma de decisiones de inversión en capacidad de generación bajo incertidumbre. Debido a la característica evolutiva y modular de la herramienta, ésta puede ser ajustada y permite la incorporación y mejoramiento de módulos conforme evolucione el mercado.

Después de presentada esta introducción, sigue el capítulo dos donde se plantea el problema de la inversión y se realiza una breve discusión metodológica, culminando con los estudios realizados acerca del tema aquí tratado. El capítulo tres presenta la descripción del modelo de simulación en Dinámica de Sistema desarrollado, seguido por el capítulo cuatro que explica la funcionalidad del micromundo así como sus características principales. En el capítulo cinco se presentan algunos casos de aplicación, para terminar con las conclusiones y recomendaciones en el capítulo seis.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y ASPECTOS METODOLÓGICOS

2.1 EL PROBLEMA DE INVERSIÓN

Una inversión es una actividad por medio de la cual se sacrifican una serie de beneficios hoy esperando beneficios futuros, al asumir una serie de riesgos con expectativas de mejores beneficios. En general, existen dos tipos de inversiones: inversiones financieras, en las cuales se busca una colocación del dinero en activos financiero tales como bonos, acciones, opciones, entre otras; y las inversiones reales que corresponden a aquellas realizadas sobre activos que generan ingresos por su utilización. En este caso se estudia únicamente las inversiones en activos reales, concretamente en proyectos de generación de electricidad en Colombia.

Las inversiones tienen características propias que justifican su complejidad. Algunas de las características mas importantes que plantean diferentes autores (VARELA, 1993; PARK y SHARP-BETTE, 1990; BLANK y TARQUIN, 1996; e ISA, 1999) son :

- Son hacia el futuro: son realizadas para que el activo real sea usado en el futuro, por lo tanto se debe tener en cuenta los futuros comportamientos técnicos, comerciales, financieros y otros, del sector productivo en la que se realizan y de desempeño del activo, entre otras.
- Riesgos: debido a que no hay certeza en el comportamiento futuro del activo, existen diferentes tipos de riesgos, entre ellos están los riesgos del mercado y los riesgos financieros, entre otros.

En el siguiente numeral (numeral 2.2) se presentan los riesgos mas representativos para la inversión en proyectos de generación de electricidad en Colombia.

- La dinámica del sector: el inversionista no es único, es decir, hay otros inversionistas en competencia, que juntos con otros factores como el comportamiento de la demanda, la regulación y otros, generan un ambiente dinámico y complejo que puede brindar grandes oportunidades o golpear al inversionista.
- Para el caso particular de inversiones reales en el SEC, éstas se caracterizan porque se convierten en costos prácticamente irreversibles, con un carácter de largo plazo, generalmente de más de 20 años. Esta visión está cambiando con las nuevas tecnologías, en particular con las generadoras térmicas a gas que poseen mayor flexibilidad.

Surge entonces la pregunta fundamental para el análisis de una inversión: ¿Se justifica la inversión, bajo determinadas condiciones de riesgo dadas? Inicialmente se pretende que los resultados de la inversión sean al menos los que se obtienen de colocar el capital en un lugar seguro. Queda implícita la necesidad de evaluar las posibles alternativas de inversión para asegurarse que el valor presente de los beneficios esperados superen al de los costos de inversión, operación y mantenimiento, y poder aceptar o rechazar un proyecto.

Para realizar la evaluación de la inversión se hace uso de los conceptos de ingeniería económica, también conocida como ingeniería de proyectos, análisis de inversiones, evaluación financiera de proyectos, entre otras. Para el análisis económico de una inversión, se debe mirar los ingresos y egresos de los proyectos, hacer un adecuado análisis de las incertidumbres y con esto se generan unos flujos de fondos o de caja que son valorados con las herramientas que brinda la ingeniería económica.

Para el caso que se está analizando se trata de inversiones en capacidad de generación, las cuales son inversiones reales orientadas a aumentar la capacidad de generación de energía eléctrica en Colombia.

El tipo de inversionista para el cual se dirige este proyecto es hacia el inversionista de riesgo, el cual está enfocado a asumir determinados riesgos ante una posibilidad de inversión a cambio de un

retorno atractivo. Este tipo de inversionista es diferente al estratégico, el cual tiene objetivos similares a los del inversionista de riesgo; pero también puede tener otro tipo de objetivos tales como conseguir posicionamiento en un determinado mercado o tener apalancamiento sobre otras inversiones y rentabilidad segura, entre otros.

2.2 RIESGOS E INCENTIVOS A LA INVERSIÓN EN GENERACIÓN

Las reformas en el SEC durante la década de los 90's ha motivado una dinámica importante en las inversiones privadas. Principalmente se han caracterizado por inversiones en activos de generación de electricidad ya existentes o en participación accionaria en diferentes empresas, debido a que este tipo de inversiones disminuye riesgos de tiempo de entrada a operar, riesgos durante la construcción, etc.

Un mecanismo establecido para incentivar la firmeza del sistema, la inversión en generación y remunerar la capacidad de reserva del sistema es el cargo por capacidad. La idea fundamental de éste es remunerar parcialmente la inversión de los generadores que contribuyen a la confiabilidad del sistema, bajo criterios de eficiencia y condiciones de hidrología crítica. Con el cargo por capacidad se pretende dar una señal económica para incentivar la permanencia a mediano y largo plazo de la capacidad necesaria para la cual el sistema opera con una cierta confiabilidad.

A pesar de los incentivos que el gobierno da para la inversión en generación, este tipo de inversiones poseen una serie de riesgos que motivan a un análisis mas cuidadoso a la hora de evaluar un proyecto de inversión en generación, algunos de los cuales son los asociados a todo tipo de inversiones, mientras que otros son particulares del SEC. A continuación se presenta la descripción de los riesgos asociados a este tipo de proyectos (adaptado de ISA, 1999):

Riesgos Comerciales

Es el riesgo asociado a la imposibilidad de obtener ingresos suficientes para cubrir los costos de operación, los costos de inversión y obtener un rendimiento aceptable para el inversionista. Este tipo de riesgo es considerablemente alto en la inversión en generación debido a factores como la volatilidad de los precios (mayor del 100% tanto en precios de contratos como en precios de bolsa),

por las variaciones de la demanda, por la incertidumbre en el comportamiento de la demanda, por la aparición de energéticos sustitutos como el gas natural y precios del gas, entre otros.

Riesgo Cambiario

La variación del peso con respecto al dólar constituye un riesgo para la inversión en generación; ya que existe incertidumbre frente a la devaluación del peso y esto afecta de manera directa el flujo de caja, particularmente cuando las inversiones en generación son dadas en moneda extranjera y respecto a la fórmula tarifaria que se cobra en pesos y tiene componentes en dólares.

Riesgo Financiero

El riesgo financiero aparece cuando la deuda de la inversión está realizada con tasas variables, pudiendo afectar la viabilidad del proyecto y los riesgos de cartera que afectan el flujo de caja y la liquidez del proyecto.

Riesgo de Fuerza Mayor

Este riesgo representa la probabilidad de que el proyecto no puede ser utilizado para generar debido a una externalidad sobre la cual el inversionista no puede actuar. A este riesgo están asociados eventos como fallas técnicas importantes, atentados terroristas contra la infraestructura del proyecto, huelgas, sismos, entre otros.

Riesgo político

Existe el riesgo de una intervención de las autoridades gubernamentales sobre el normal funcionamiento del mercado y por lo tanto del proyecto. Las posibles intervenciones van desde restricciones en la operación del proyecto hasta la expropiación de los bienes.

Riesgo Ambiental

Es un riesgo que generalmente aparece durante la construcción y operación del proyecto. Este se da por el peligro de eventuales retrasos en la entrada en operar el proyecto, en un posible incremento considerable en los costos e inclusive en negar la licencia ambiental o nuevas legislaciones ambientales que generan mayor incertidumbre en los análisis. Este riesgo puede antes de la toma de decisiones de inversión.

Riesgo Regulatorio

Se presentan debido a la estructura regulatoria del SEC y las instituciones encargadas de la reglamentación del mercado. El creciente número de regulaciones en el mercado dan prueba de una dinámica que constituye un riesgo, que puede afectar a las inversiones u oportunidades.

En la medida en que los riesgos asociados a la inversión aumente, hacen que el inversionista espere una rentabilidad mayor. Además, la presencia de mayores riesgos hace necesario una evaluación del proyecto mucho mas cuidadosa.

2.3 COMPLEJIDAD DE LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS

Los sistemas energéticos son el resultado de la interacción no lineal de varios factores con características muy diferentes entre sí que generan una alta complejidad en su análisis. En particular, para el sector eléctrico, interactúan la oferta, la demanda, la transmisión y el medio ambiente; todos ellos aportando complejidad individual adicional a la sinergia existente por sus interacciones.

La oferta energética está caracterizada por diversas fuentes y variada tecnología, además de las estructuras de propiedad existentes que son pública, privada y combinación de éstas. En cuanto a la demanda, se cuenta con muchas clases de necesidades según el tipo de usuario; además de la presencia de energéticos sustitutos como lo son el gas natural. La transmisión y la distribución, componentes que unen los centros de producción con los usuarios finales a través de redes, donde aparecen elementos como altos costos de inversión, restricciones del sistema, voladura de torres, entre otros. Los anteriores aspectos están directamente relacionados con el desarrollo tecnológico, particularmente en los sistemas eléctricos donde se puede apreciar la amplia variedad de equipos, materiales, etc.

La nueva normatividad ambiental representa un elemento adicional de complejidad sobre los sistemas eléctricos. Este aspecto ha ganado gradualmente más importancia debido a los impactos ambientales, generalmente negativos, de los sistemas eléctricos y por las presiones de diferentes grupos ambientalistas.

En conclusión, en el análisis de los sistemas eléctricos se debe tener en cuenta su complejidad; por lo tanto los análisis deben ser muy cuidadosos en aspectos como la selección de la(s) herramienta(s) a utilizar, de las variables que desee manejar, de la incertidumbres y de los supuestos. Por tal motivo, a continuación se muestra un resumen del análisis metodológico por medio del cual se llegó a la selección de la metodología utilizada.

2.4 ANÁLISIS METODOLÓGICO

La modelación y el entendimiento de los sistemas eléctricos ha sido basada en los esquemas de evolución de estos sistemas. Inicialmente se tenía un esquema de planeamiento centralizado donde se tenían objetivos claros, el cual evolucionó hacia nuevos esquemas de mercado con superior incertidumbre. Este cambio fue motivado por la búsqueda de la eficiencia en el uso de los recursos y una adecuada satisfacción del usuario final en términos de calidad, eficiencia y costos. Las herramientas de análisis y soporte también han evolucionado con los esquemas adoptados.

En general, se ha buscado hacer uso de modelos para el análisis energético y la toma de decisiones; pero en la actualidad esta tendencia se ha incrementado en el sector energético para investigar la interacción entre energía, economía, políticas regulatorias, conservación, impacto ambiental, estrategias y recientemente, los impactos de la privatización (Bunn y Larsen, 1997). La complejidad asociada a los sistemas energéticos es una de las causas de la necesidad de la modelación de los mismos.

El planeamiento centralizado proviene del pensamiento en la cual se tienen objetivos y metas claros, buscando una adecuada asignación de recursos. Para este esquema las herramientas tradicionalmente más utilizadas han sido la optimización y la simulación econométrica. Uno de los modelos de optimización más comunes a nivel mundial ha sido el MARKAL – MARKET ALlocation – (Goldstein y Hill, 1996), el cual hace una representación de los flujos de energía desde los centros de producción hasta los usuarios finales, y que ha sido utilizado en numerosos países (Goldstein, 1995). Para casos más particulares se han desarrollado otros modelos de optimización tales como EGEAS y ECAP (Bunn y Larsen, 1997).

Colombia no ha sido una excepción en el uso de las herramientas de optimización y econometría para la modelación, en especial cuando se tenía el esquema centralizado. La UPME ha utilizado para el planeamiento energético modelos de optimización – simulación como el SUPER/OLADE-BID (OLADE y BID, 1993) y modelos econométricos (UPME, 1995), ambos para el planeamiento energético. Incluso hoy en Colombia se manejan modelos de optimización como el MPODE (Pereira y PSRI, 1997) para la operación del sistema.

El uso de herramientas como las anteriores, que fueron útiles durante el planeamiento centralizado han sido criticadas. Las principales críticas se enfocan al análisis metodológico, al proceso de modelamiento, a la evaluación de estrategias y regulaciones, al análisis de la incertidumbre y a la credibilidad del modelo, entre otras (Lee y otros, 1990). También se refieren a éstas (Dyner, 1995) como normativas, ya que se forzan soluciones óptimas globales; determinísticas, al no incorporar la incertidumbre de las variables; lineales, por que no representan las no linealidades en las relaciones entre variables; sistémicas, debido a que no tienen en cuenta los ajustes que realizan las componentes ante diferentes comportamientos del sistema; mecanísticas, ya que asumen un comportamiento racional en condiciones de información perfecta; y estacionarias, cuando suponen que el comportamiento futuro será como ha sido el pasado.

Adicionalmente, la complejidad y los nuevos elementos en los sistemas energéticos y en particular los sistemas eléctricos, generan nuevos requerimientos metodológicos que son un reto para las herramientas de modelamiento. Los nuevos requerimientos metodológicos se resumen en (Dyner, 2000):

- **Modularidad:** poder mirar el sistema a través de componentes, sin necesidad de tener todo el modelo de análisis desarrollado. Dar la posibilidad de desarrollar módulos sin perder de vista la visión sistémica del problema.
- **Realimentación y Ajuste continuo:** permitir la actualización del modelo, no solo en la información, sino a través de mecanismos de realimentación.
- **Transportabilidad:** incorporar estructuras de modelamiento con los respectivos ajustes para aprovechar los avances en modelación ya realizados.
- **Transferibilidad:** que el usuario conozca el modelo; desde los supuestos hasta los resultados.

- **Manejo de Incertidumbre:** es necesario tener un adecuado tratamiento de ésta, ya que es uno de los factores más marcados en las nuevas estructuras de mercado de los sistemas eléctricos.

Surgen entonces nuevas herramientas alternativas y complementarias a las metodologías tradicionales. Una de ellas es el desarrollo de plataformas en Dinámica de Sistemas - DS - para el análisis energético que permite involucrar retardos y realimentación entre componentes del sistema. Esta herramienta fue usada inicialmente en el modelamiento energético con el modelo COAL, el cual evolucionó y actualmente se llama IDEAS (Nail, 1992). IDEAS, es un modelo que ha sido una herramienta importante en el planeamiento energético en Estados Unidos. A escala regional se han planteado numerosos modelos que pueden ser vistos en Ford (1997). Ford (1997), desarrolló un modelo en Dinámica de Sistemas para analizar el crecimiento de la industria eléctrica en Estados Unidos.

Para el caso colombiano, el estudio “Planeamiento Integrado de la Expansión de un sistema Hidrotérmico Interconectado de Generación de Energía Eléctrica” realizado por la Universidad Nacional de Colombia y Colciencias (1997) recoge un amplio marco metodológico para la expansión del sector eléctrico. En este se hace uso de diversas técnicas de optimización, se realizan algunos procedimientos para considerar la incertidumbre en el problema de la expansión, se aplican metodología de múltiples objetivos y se hace una primera aproximación de la expansión en un ambiente de competencia. El análisis de la competencia en la expansión también fue realizado por Montoya (1997), quien utilizó bases similares a las dadas por el modelo de Ford y agregó parte de las componentes de incertidumbre propias del caso colombiano, además de innovar con el uso de DS en ese campo para Colombia. El proyecto realizado por INTEGRAL – UN – COLCIENCIAS (1999) analizó el problema de inversiones desde el punto de vista del inversionista de una manera dinámica, utilizando la DS. Se han planteado herramientas complementarias como los algoritmos genéticos (Pulgarín y Smith, 1999) en el problema de la expansión de sistemas de generación.

A pesar de todos los posibles cuestionamientos que pueden tener una u otra metodología, se encuentra hoy en día la aplicación de numerosas herramientas en todas partes del mundo, que incluyen modelos de optimización, de simulación, de equilibrio general, econométricos, entre otros, las cuales se muestran en Bunn y Larsen (1997), texto que recoge el modelamiento utilizado para el análisis de políticas energéticas. Esta riqueza metodológica crea la necesidad de ser muy cuidadoso al elegir la herramienta a utilizar.

Para el caso del análisis de inversiones, la herramienta seleccionada debe tener en cuenta las incertidumbres generadas después del proceso de liberalización de los mercados seleccionados. Estos mercados, en general poseen las incertidumbres de un mercado eléctrico: en la hidrología, en la demanda, en el suministro de combustibles, en los precios y en la oferta, entre otras. Estas características generan la necesidad de enfocarse en el análisis del comportamiento del sistema, más que en la búsqueda de una solución óptima, que posiblemente no exista. No es posible usar un modelo de optimización para este caso, ya que no se tiene una función objetivo definida: los agentes pueden tener diferentes objetivos dependiendo de sus estrategias y del tiempo, es decir, en ocasiones pueden buscar maximizar sus utilidades o mejor ganar porción de mercado, e inclusive, buscar liquidez. En ocasiones sus estrategias podrían tener varios objetivos combinados.

Debido a esto, se busca entender comportamientos y aprender sobre la dinámica de los mercados en ambientes de incertidumbre. Se plantea el desarrollo de un micromundo que permita el aprendizaje acerca del problema de inversión en nueva capacidad de generación soportado en modelos de simulación en Dinámica de Sistemas -DS-. Se busca hacer un análisis del comportamiento del sistema, una adecuada abstracción de la realidad y los impactos que puede tener un proyecto compitiendo dentro de un sistema. A continuación se muestra el esquema propuesto de la herramienta utilizada y se mostrará como ésta permite satisfacer los requerimientos metodológicos expuestos.

MICROMUNDOS O SIMULADORES

Los micromundos o simuladores son herramientas que facilitan el aprendizaje de sus usuarios. Estas herramientas están basadas en el enfoque sistémico planteado por Senge (1993). En los micromundos se estructuran modelos que representan diversas circunstancias que se pueden presentar en la realidad, permitiendo al usuario entrenarse para “sobrevivir en el sistema representado” mediante el uso del micromundo.

Este mecanismo de aprendizaje se asemeja a los simuladores de vuelo diseñados para el entrenamiento de pilotos aéreos. En los simuladores de vuelo no se pretende pronosticar una

tormenta o un daño de una turbina, sino preparar al piloto ante este tipo de eventualidades, de tal manera que pueda responder acertadamente en estas contingencias.

Se han construido ‘micromundos’ para la capacitación con el fin de prepararlos a enfrentar las situaciones propias de su actividad. Estas herramientas son ‘juegos’ en los cuales se simula el comportamiento del sistema como consecuencia de las decisiones que se toman, en donde una parte importante de la simulación es la preparación y elección de las decisiones (Dyner y otros, 1998)

Los micromundos generalmente son parte de cursos de capacitación que tienen por objetivo explicar las condiciones del sistema y el entrenamiento de sus participantes.

Algunos de los micromundos más representativos son:

- *El juego de la cerveza*: simulador creado a partir del juego del mismo nombre, el cual fue diseñado por Forrester en los comienzos de DS. Fue creado para entender la complejidad y las estructuras en las cadenas productivas (Machuca y Del Pozo, 1997).
- *People Express*: basado en el caso de la compañía aérea del noreste norteamericano, que en cinco años llegó a ser líder en utilidades y porción del mercado; pero en un corto período de tiempo se quebró. Con este micromundo se pretende que el usuario desarrolle sus habilidades de asignación de recursos en una empresa (Senge y Lannon, 1992)
- *Oil Producers*: diseñado para experimentar con estrategias de inversión para incrementar la capacidad de producción del sistema global de petróleo. Las decisiones son el precio del barril de petróleo y a partir de éste se puede observar la evolución en la capacidad de producción. Éste ha sido utilizado para el entrenamiento de nuevo personal a través del análisis de escenarios y la discusión en grupo (Genta y Neville, 1996).
- *Restaurantes Beefeater*: Es el caso de la cadena de restaurantes Beefeater de Inglaterra que creció en corto tiempo hacia un mercado masivo por encima de la competencia. El Micromundo permite al usuario proponer su propia estrategia de crecimiento mediante 6 decisiones que definen el tipo de estrategia. El micromundo presenta un amplio número de

gráficas y reportes que le permiten visualizar al usuario el desempeño de su utilización (Langley y otros, 1996).

- *Enerbiz – micromundo*: micromundo desarrollado como herramienta comercial para capacitar agentes en la comercialización de energía en el mercado eléctrico colombiano. En este, el usuario toma decisiones de compra y venta de energía, de inversión en mercadeo y de compra de pronósticos hidrológicos; mientras que recibe como retroalimentación información acerca de su desempeño, del estado del sistema y del manejo del riesgo (Smith y otros, 1999).
- *Electricity Market Microworld*: es un simulador de un mercado eléctrico desregulado. El usuario comienza en un mercado abierto a la competencia recientemente, donde antes de la desregulación era monopolio por parte de la generación. El usuario selecciona un papel de manera que se ubique como un agente determinado en el mercado (Vlahos, 1998).

El uso de Micromundos permite el trabajo en grupo, el análisis de casos hipotéticos, la reevaluación de los modelos mentales que se tienen acerca del sistema en cuestión, confrontación con simulaciones en computador y ahorro de costos, entre otros. El esquema de funcionamiento de los Micromundos planteado en Senge y Lannon (1992) se muestra en la Figura 1. En un sistema, una vez se toman las decisiones, estas afectan el sistema actual de manera retardada. La respuesta del sistema, se retarda de nuevo y brinda información que hace replantear los modelos mentales de las personas que interactúan en el sistema y con estos se plantean determinados objetivos y estrategias. A partir de una reflexión sobre los objetivos y estrategias y de la información obtenida del sistema, se toman decisiones que afectan retardadamente el sistema real. El papel del Micromundo es hacer un puente que muestre la información del sistema después de la toma de decisiones, haciéndolo de manera inmediata y virtual, y sin necesidad de incurrir en los costos que puede traer determinada decisión en el sistema real.



Figura 1. Micromundos en la toma de decisiones

Los micromundos siguen el planteamiento de un antiguo proverbio chino: *“Cuando escucho, olvido; cuando veo, recuerdo; pero cuando hago, entiendo”*.

Una vez identificado el problema de inversión y el ambiente de incertidumbre en el SEC, se desarrolló un micromundo para inversión en el SEC como herramienta de aprendizaje y de análisis. El uso de este micromundo ayuda a entender la evolución del mercado ante diferentes formas y criterios de inversión, además, sus funcionalidades permiten entender el entorno para realizar la inversión y cuantificar las consecuencias de las decisiones, apoyar el proceso de toma de decisiones, definir posibles estrategias de inversión en el SEC y facilitar la discusión sobre cursos de acción y sobre las decisiones tomadas.

DINÁMICA DE SISTEMAS

Se propone el uso de Dinámica de Sistemas para el modelamiento del proceso de toma de decisiones en inversión en el SEC. En términos generales, la Dinámica de Sistemas permite involucrar retardos y realimentación entre componentes del sistema, aspectos fundamentales en el proceso de aprendizaje.

Con DS, se puede ver como se influye sobre el sistema y cuál es su respuesta ante diferentes estrategias y/o políticas. La Figura 2 muestra cómo es la representación general de un sistema y cómo es la realimentación. Dados los objetivos sobre el sistema, se formulan e implantan estrategias y/o políticas, las cuales tienen determinado efecto sobre el sistema. Dependiendo de los resultados obtenidos, se realiza una evaluación de la estrategia y/o política. Finalmente, con la evaluación y el análisis del comportamiento del sistema se puede saber que está pasando, lo que hace necesario revisar los objetivos propuestos y si se requiere, replantearlos.

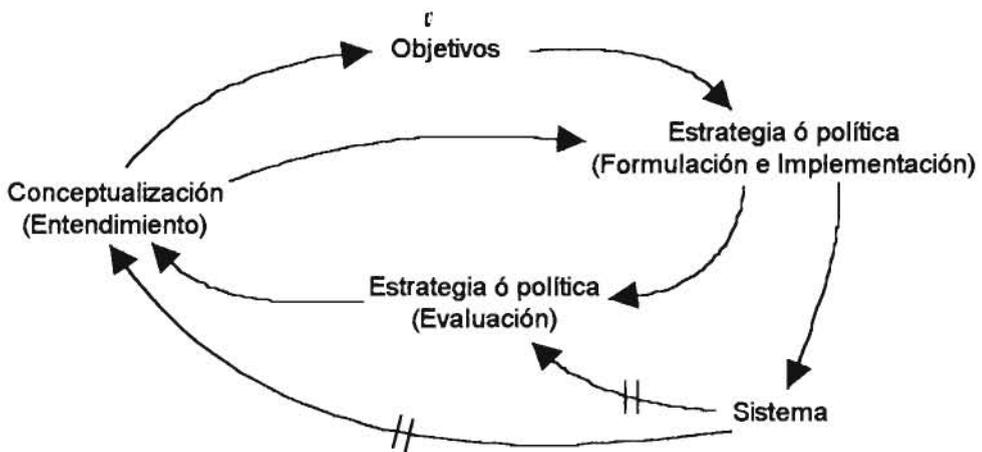


Figura 2. Representación esquemática del análisis general de un sistema (Dyner, 2000)

Los modelos en DS permiten estudiar el comportamiento de los sistemas a través de simulaciones. Estos modelos representan el sistema a través de ecuaciones diferenciales que incluyen componentes no lineales, y se busca entender el sistema a través de diagramas causales que muestran las relaciones causa - efecto entre las variables. Esta herramienta puede ser vista de manera detallada en Dyner (1993), Aracil y Gordillo (1997) Y Sterman (2000).

3 MODELO DE SIMULACIÓN EN DINÁMICA DE SISTEMAS

El micromundo para inversión en el SEC desarrollado está soportado en un modelo de simulación en DS que muestra la evolución del sistema bajo las consideraciones que indique el usuario y otras predeterminadas. El objetivo del modelo es estimar el flujo de caja e indicadores económicos de un proyecto de generación de electricidad dada la decisión de inversión que el usuario del micromundo tome.

Este modelo recoge gran parte del conocimiento generado en diferentes modelos que se han realizado en el ambiente de mercado del SEC. En particular, se retoma el trabajo de Montoya (1996) el cual realiza un planteamiento innovador respecto al problema de la expansión en ambientes de competencia; adicionalmente, revisan nuevos conceptos y metodologías de modelamiento en DS para la inversión en generación en el SEC con el proyecto UNCOLCIENCIAS-INTEGRAL (2000). Del proyecto “Opciones de Manejo del Recurso Hidroeléctrico en el Mercado Eléctrico Colombiano” se recoge nueva información y conceptos, donde el modelo resultante sirvió de soporte para el modelo aquí presentado. Adicionalmente, del proyecto “Micromundo para Comercialización de Energía en el Mercado Eléctrico Colombiano” se recogen conceptos de comercialización de energía (ISA y UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, 2000). El modelo permite al usuario del micromundo obtener resultados como consecuencia de sus decisiones hipotéticas de inversión. A continuación se presenta la estructura general del modelo y el desarrollo de los módulos que lo componen.

3.1 ESQUEMA GENERAL

La plataforma de modelamiento desarrollada está basada en el ciclo planteado para estudiar la dinámica de los mercados eléctricos modernos (Bunn y otros, 1997). La Figura 3 muestra las principales variables a estudiar en el Mercado Eléctrico Colombiano. Partiendo de la diferencia entre capacidad de generación y demanda de electricidad, es decir, del margen del sistema, se afecta el precio de la electricidad y el precio afecta la demanda debido a la elasticidad existente entre estas variables, formando un ciclo de retroalimentación. Por otra parte, el precio de la electricidad y el margen en capacidad presentan incentivos a invertir, los cuales afectan la capacidad de generación y se cierra de nuevo otro ciclo de retroalimentación.

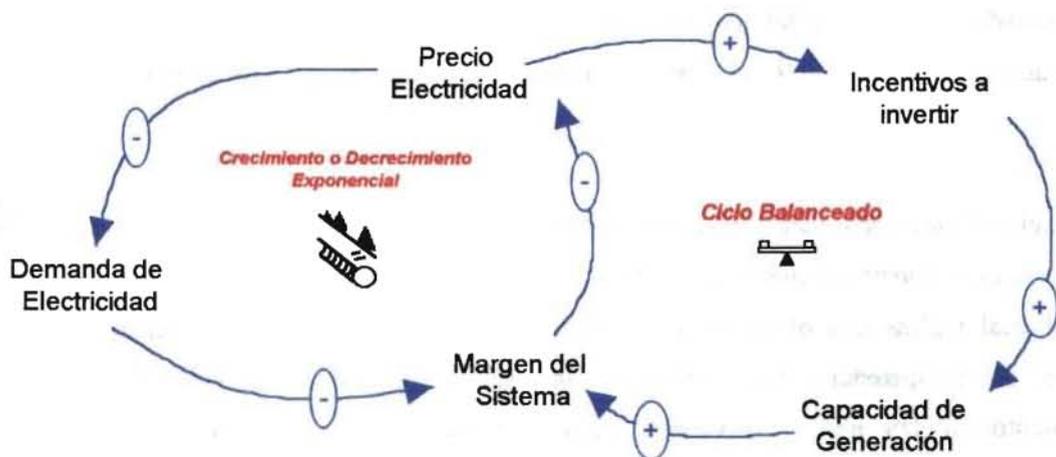


Figura 3. Dinámica del mercado de energía eléctrica en Colombia

Adicionalmente a las variables presentadas en Figura 3, existen otra serie de variables que afectan directamente el mercado. Las principales influencias adicionales son:

- **Demanda de Electricidad:** está influenciada por variables socio - económicas como el ingreso, el Producto Interno Bruto y por la población.