

# EVALUACIÓN DE UN PORTAFOLIO DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD, UTILIZANDO DINÁMICA DE SISTEMAS

JUAN FELIPE FRANCO BARRERA, MSc

ISAAC DYNER R., PhD.

*Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Facultad de Minas*

*\*Este artículo es producto de investigaciones llevadas a cabo en el marco del proyecto “El mercado de la energía eólica en Colombia: operación, riesgo y posibilidades de expansión”, cofinanciado por la Universidad Nacional de Colombia, Empresas Públicas de Medellín y COLCENCIAS.*

## RESUMEN:

La conformación de un Portafolio Tecnológico por parte de un agente generador de electricidad en Colombia motiva su estudio, entre otras razones porque Empresas Públicas de Medellín (EEPPM.) es el único agente que se encuentra en la actualidad desarrollando nuevos proyectos de generación en el país, y explora la posibilidad de generar energía con una tecnología diferente a las predominantes hidráulica y térmica, como es la tecnología eólica.

Con un modelo en Dinámica de Sistemas (DS) se representa el sistema de generación colombiano, haciendo énfasis en las plantas de EEPPM. Teniendo en cuenta una componente de tecnología eólica instalada, sumada a sus plantas de generación hidráulica y térmica, se conforma el Portafolio de Generación de Electricidad de EEPPM. y se simula su operación en el mercado colombiano de energía.

Gracias a la representación efectuada con el modelo, se estudió el comportamiento del Portafolio y el resultado de la incorporación de un parque eólico de capacidad importante entre las alternativas de generación de esta empresa. Se muestra como la alta inversión en un Parque eólico afecta el Flujo de Caja y disminuye la rentabilidad del portafolio, pero a su vez reduce el Riesgo y el Valor a Riesgo (VaR) del mismo. Además se ilustra la ventaja de contar con la tecnología eólica como alternativa de generación eléctrica durante períodos de sequía, como el fenómeno del Niño.

**PALABRAS CLAVES:** Portafolios tecnológicos, Generación de energía, Energía eólica, Riesgo, Complementariedad.

*\*Este artículo es producto de investigaciones llevadas a cabo en el marco del proyecto “El mercado de la energía eólica en Colombia: operación, riesgo y posibilidades de expansión”, cofinanciado por la Universidad Nacional de Colombia, Empresas Públicas de Medellín y COLCENCIAS.*

## ABSTRACT:

The construction of a Technological Portfolio in charge of a firm of electricity generation in Colombia leads to its study, among other is the case of Empresas Publicas de Medellin (EEPPM.), because this company is nowadays building new electricity projects in Colombia. EEPPM. will provide electricity using a new technology in Colombia, which is wind power, for the national grid joining hydraulic and thermal generation.

A System Dynamics (SD) model was constructed to represent the national power system, specially the EEPPM. generation facilities, combining both hydraulic and thermal plants along with the new wind farm of EEPPM, the new Technological Portfolio can be represented.

SD is useful to learn about the different variables considered in the model, in order to represent interactions, delays and feedbacks that are present in the considered system. The study of the EEPPM portfolio performance allows to understand not only the impact of the high investment in wind power technology, but to study its possible benefits for the portfolio, like Risk and Value at Risk (VaR) reductions. Furthermore, the simulations show the advantage of wind power generation during dry seasons, as ENSO oscillation.

**KEYWORDS:** Technological portfolio, Electricity generation, Windpower, Risk, Complementary.

## 1. INTRODUCCIÓN

Para una empresa generadora de energía, el mercado eléctrico colombiano representa grandes oportunidades, pero a su vez implica diversos riesgos. La abundancia en recursos hidráulicos, representada en buenos niveles de los embalses, permite a las empresas con una alta componente hidráulica operar en condiciones tales que no incurren en un alto riesgo de incumplir contratos de energía.

Sin embargo, las estaciones secas ocasionan que el riesgo de incumplir esos contratos crezca, pues la generación hidráulica puede resultar insuficiente. En caso de no tener ninguna alternativa tecnológica ante una baja hidrología, un agente podría verse obligado a cumplir sus obligaciones contractuales comprando energía en Bolsa, lo cual precisamente en los períodos secos es mucho más costoso.

A su vez, la elevada fluctuación en el Precio de Bolsa, o Volatilidad, puede afectar adversamente los flujos de caja de los

agentes, incrementando el Riesgo en que incurren, así como su Rentabilidad, Valor a Riesgo (VaR), etc. Ahora que EEPPM cuenta con otra alternativa tecnológica para generar electricidad, una adecuada administración de ese nuevo portafolio conformado, le permitirá un mejor posicionamiento en el mercado.

Con la integración de un portafolio de generación de electricidad, diversificado con tres alternativas, se introduce realimentación y complejidad en el sistema de generación de EEPPM., y surge el interés por estudiar qué pasará con el desempeño de este agente en el mercado.

Con un modelo en DS que represente la operación conjunta de las tecnologías de generación de EEPPM., hidráulica, térmica y eólica se podría aprender sobre el comportamiento de ese portafolio de generación de electricidad y poder evaluar sus posibles ventajas y desventajas, así como podrían proponerse estrategias de operación.

## **2. ANTECEDENTES**

La creciente demanda, además de la preocupación por la preservación del medio ambiente, hace que deba replantearse el esquema mundial de explotación de los recursos no renovables con miras al futuro aprovisionamiento de recursos energéticos (Jagadeesh, 2000; Yue, Liu, y Liou, 2001).

Y son precisamente las nuevas tecnologías, cuya fuente no sea de origen fósil, las que reciben mayor atención en procura de su desarrollo, dado que el agotamiento de los combustibles fósiles es una de las preocupaciones más discutidas en el entorno mundial actual. Desde 1973, luego de la crisis del petróleo se extendió el uso de otras fuentes de energía como el carbón, el gas y la energía nuclear (Concha y Jaimes, 1999), pero en la última década la preocupación por el medio ambiente y el futuro problema energético de agotamiento de los combustibles fósiles, han creado conciencia sobre la necesidad de utilizar energía de fuentes no convencionales para generación de energía eléctrica (El-Sayed, 2002).

El desarrollo de las energías alternativas en los últimos 20 años ha sido dramático, dentro de éstas la tecnología eólica se ha destacado por la impresionante disminución de sus costos, los cuales hoy la hacen competitiva en los mercados de los países desarrollados, frente a algunas tecnologías convencionales (OSTP, <en línea>, 1997).

Una de las aplicaciones de la energía eólica que más difusión tiene en la actualidad es la de Parque Eólicos para producción eléctrica (ITER, 2004;). Los costos de inversión han experimentado una reducción muy notable en los últimos años, el precio final de la energía eléctrica de origen eólico, es comparable a la producida en plantas termoeléctricas nuevas (ITER, 2004; ADIE, 2003).

El abastecimiento de energía en Colombia aprovecha principalmente el recurso hidráulico del país; no obstante a causa de la crisis energética o “apagón” de 1992 y el sucesivo Fenómeno del Niño debió considerarse la diversificación de fuentes de energía y disminuir la dependencia de las fuentes hidráulicas para generación eléctrica. De esta forma, la generación térmica se incrementó y se construyeron varias plantas en la década de los

‘90. Durante los años 1993-2000, la composición del parque generador pasó de un 80% de composición hidráulica y 20% térmica, a un 68% y 32% respectivamente (Ochoa, 2001).

La nueva composición la capacidad instalada del SIN afrontó el Fenómeno del Niño durante 1998, y si bien fue más intenso, no hubo apagón (Ochoa, 2001). Se evitaron las terribles consecuencias para la economía del país, hablando de unos costos directos que ascendieron a tres mil millones de dólares, que pagaron todos los estamentos de la sociedad colombiana (Velásquez, 2002).

Las plantas térmicas en Colombia, a pesar de que en condiciones críticas han aportado enormes beneficios al Sistema Interconectado Nacional (SIN), presentan otro tipo de problemas tales como su costo de mantenimiento, el costo del combustible que emplean, su forma intrínseca de operación, el retiro de plantas debido a su antigüedad, entre otros. Este tipo de fuentes de energía, cuya fuente básica es fósil, están siendo reemplazados por iniciativas como los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL), previsto en el Protocolo de Kyoto, que procuran limitar la emisión de gases de efecto invernadero (Concha y Jaimes, 1999). Por las razones antes expuestas, es conveniente considerar otras opciones tecnológicas.

La complementación térmica, para el sistema que antes fue predominantemente hidroeléctrico en Colombia, propone que en los años secos las centrales térmicas suplan la base de la demanda y las hidráulicas el pico (Sanclemente, 1993).

Con la inclusión de la tecnología eólica en Colombia, y concretamente entre las opciones de EEPPM, cabe preguntarse entonces, ¿qué podría esperarse con la diversificación del portafolio de generación de electricidad de una empresa, para operar de forma más adecuada tres tecnologías diferentes? ¿Podrá reducir su riesgo de déficit de recursos para generar electricidad? y, ¿cómo operar de tal forma que pueda obtenerse la mejor relación costo-beneficio, en otras palabras Rendimientos vs Riesgo?

## **3. MERCADO DE ENERGIA Y DIVERSIFICACIÓN DE FUENTES DE ENERGÍA EN COLOMBIA**

Muchos factores han contribuido para que un país decida adoptar la libre competencia e incorpore la competencia a su mercado de energía. En algunos países, la baja productividad de su sector eléctrico, la intervención política, y el deterioro de las plantas existentes, entre otros, motivaron las reformas con miras a la liberalización del mismo. El caso colombiano se caracterizó por las dificultades financieras, la deuda externa, el alto costo de los proyectos, y el costoso apagón (Dyner, 1998).

En 1994, las nuevas leyes 142 y 143, introdujeron una profunda reforma en el Sector Eléctrico Colombiano (SEC), modificando de manera drástica el panorama (Ochoa, 2001). Se incorporó la desregulación y la competencia en el Mercado Eléctrico Colombiano (MEC) con dichas leyes, lo cual generó una nueva dinámica en el sector, así como nuevos roles para los diferentes agentes (Montoya y Smith, 1997).

### **3.1 ENERGÍA EOLICA EN COLOMBIA**

A pesar de que la tecnología eólica ha tenido un gran crecimiento durante los últimos 20 años, en Colombia se ha considerado

esta tecnología de forma muy aislada y no se han llevado a cabo proyectos de dimensión considerable, como son los parques eólicos. Hasta hace unos años sólo se contaba con algunos estudios que ilustraban la posible explotación de esta tecnología en Colombia, no sólo para generación eléctrica sino también para sistemas de bombeo (Pinilla, 1997).

La posibilidad de instalar grandes plantas de generación eólica se planteó en la región de la costa atlántica y el archipiélago de San Andrés (Umaña, 2000), mostrando esta tecnología como una alternativa para generación eléctrica para el país, gracias a las condiciones de vientos de estas zonas.

Precisamente en la costa norte colombiana, en el departamento de la Guajira, se ubica el primer Parque Eólico del país, Jepírachi integrado al SIN, con una capacidad instalada cercana a los 20MW. Con la entrada en operación del parque, se podrá evaluar la real potencialidad de la generación eólica en la región (EE.PP.M., 2001).

Surgen muchos interrogantes, operativos y legislativos, para la explotación de esta tecnología en el mercado colombiano. No se cuenta con la experiencia que tienen otros países más desarrollados, con mayor conocimiento en la aplicación de la tecnología, y donde además operan mecanismos que incentivan la generación de energía con tecnologías limpias.

Por tanto, se hace necesario evaluar qué puede ocurrir con el desempeño en el MEC de una empresa, que como EEPPM., realiza este tipo de inversión.

Se espera que, dada la necesidad de diversificar las fuentes de generación de energía en Colombia, se materialicen las iniciativas que pretenden la penetración de energías limpias a gran escala, permitiendo una expansión del sistema de generación, con base en energías alternativas, como la eólica.

El caso puede ser análogo al de la liberalización del mercado, a mediados de los noventa, donde se asimilaron experiencias internacionales para la modernización del sector (Dyner, 1998)

Es necesario estudiar el caso esta empresa, que integra a sus alternativas de generación de electricidad la eólica, ya que podría repensar la operación simultánea de sus tecnologías tradicionales, con miras a obtener mejores rendimientos sobre su inversión, de acuerdo con la estación climática.

### **3.2 DIVERSIFICACION EN LAS FUENTES DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD EN COLOMBIA**

La dependencia de una sola tecnología para generación de electricidad, se solucionaba construyendo plantas cuya fuente no fuera el agua, y que estuvieran en condiciones de aportar energía al SIN en el caso de que la fuente predominante no pudiera hacerlo. Dicho de otra forma, debía reducirse el riesgo de que la generación de las plantas hidráulicas fuera otra vez insuficiente para abastecer la demanda.

De manera análoga a un caso financiero: cuando un inversionista se encuentra ante la decisión de cómo invertir su capital y escoge una sola acción (o un grupo de acciones que se comportan de igual manera) estará recibiendo buena rentabilidad de su inversión

cuando la acción suba, pero estará perdiendo cuando ésta baje su cotización en la bolsa. Para el inversionista sería deseable entonces invertir en acciones que se comporten de manera diferente, de tal forma que ante las eventuales pérdidas por causa de los malos rendimientos de unas acciones, pueda contar con otras, que con sus ganancias, compensen los malos resultados de las demás (Vélez, 2003).

Cabe preguntarse si este razonamiento podría aplicarse también al caso de las centrales eólicas, cuyo combustible, el viento no representa costos y estará siempre disponible en las estaciones secas a diferencia del agua en las hidráulicas; por otro lado, la potencial complementariedad hidráulica-eólica (o comportamiento complementario entre los regímenes de viento y el régimen de caudales de los ríos) permite suponer una ventaja adicional, al contar con la alternativa eólica para períodos secos, que compense el bajo nivel de los embalses en el verano y posibles restricciones en el suministro de gas (COLCIENCIAS, EEPPM, Universidad Nacional, 2003).

Continuando con la analogía al caso financiero, se estaría compensando el mal desempeño de algún "activo", con los buenos resultados de "otro activo" del mismo Portafolio (Vélez, 2003).

El cubrimiento de un déficit en atención de contratos resulta muy costoso para las generadoras cuando el precio de Bolsa es muy alto, normalmente durante los períodos secos. En Colombia, las centrales térmicas aumentan su generación durante las sequías, pero el precio de su energía es mayor, como se mencionó.

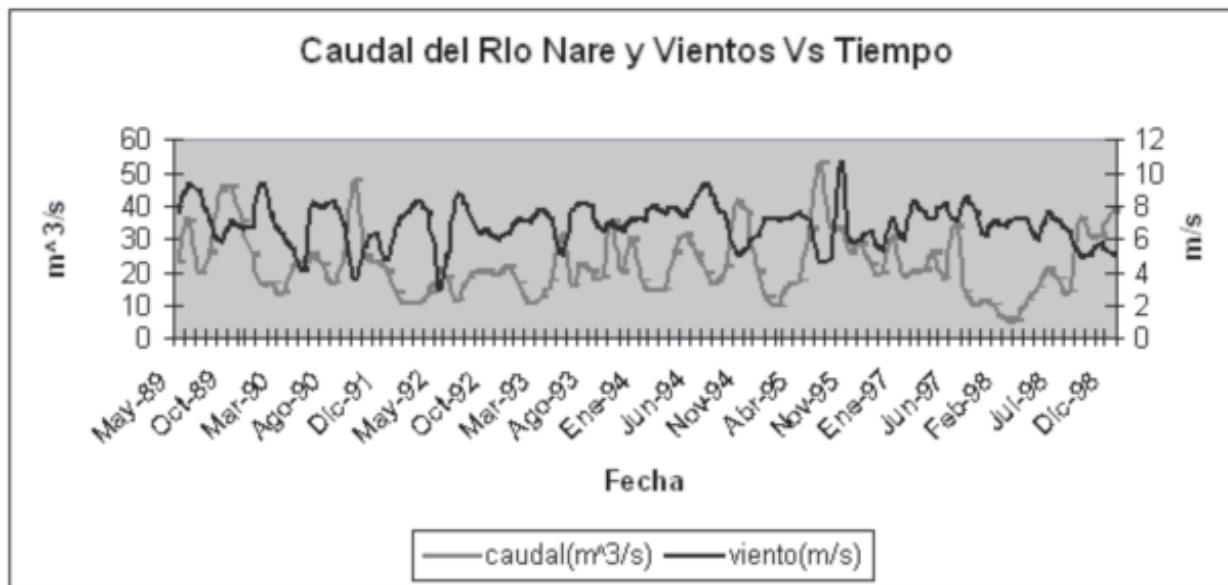
Por otro lado, la construcción de plantas térmicas no es garantía por si sola de que se elimine el riesgo de un nuevo apagón. Si bien el sistema ganó en firmeza en la década de los noventa, y se contó desde entonces con plantas térmicas en mejores condiciones para la operación, existe el riesgo de que ante condiciones hidrológicas severas no se pueda abastecer de gas a estas plantas:

La alternativa térmica a gas debería ser 100% confiable, pero en Colombia parece que no es así. El problema radica en que las dificultades para trasportar su combustible, puesto que el suministro de gas pone a las plantas térmicas en el último lugar de prioridad, con presencia de un fenómeno del Niño sólo podrían operarse las plantas a la tercera parte de su capacidad instalada, es decir, no alcanzarían una generación a plena capacidad para cubrir un eventual déficit (Ochoa, 2001).

Dadas las características de las tecnologías hidráulica y eólica, y la forma como operan éstas en el MEC, sería conveniente integrar otras opciones de generación con características diferentes. Los beneficios de reducir el riesgo de déficit en el sistema pueden conseguirse entonces con la construcción de un Portafolio Tecnológico, construido a partir de tecnologías diferentes (Calle, 2001).

### **3.3 PORTAFOLIOS TECNOLOGICOS**

La conformación de una "canasta" de alternativas para generación de energía, con diferentes características y combustibles de generación, está siendo impulsada a nivel mundial, especialmente para contrarrestar la dependencia de combustibles contaminantes. Por ello se menciona que el futuro energético de los países requiere un portafolio diversificado de tecnologías y opciones que permitan



**Figura 1 Complementariedad hidráulica-eólica, Caudal Río Nare-Régimen Viento Alta Guajira, Fuente: COLCIENCIAS-EE.PP.M.-Universidad Nacional, 2003**

modificar el actual sistema de abastecimiento (OSTP, <en línea>, 1997).

Comúnmente se dice “no poner todos los huevos en la misma canasta”, es decir, no arriesgar los bienes susceptibles a los mismos peligros. De tal forma que una empresa como EEPPM. puede plantearse alternativas tecnológicas para reducir su riesgo de incumplir sus contratos y evitar las compras de energía en Bolsa.

Un agente puede perder si tiene contratos a largo plazo por un valor dado y su recurso es intervenido, ya que no puede generar y podría verse obligado a comprar a precios mayores en el mercado a corto plazo la energía comprometida en dichos contratos (Calle, 2001).

Cuando se trata de conjugar varias alternativas para reducir el riesgo, buscando diferentes opciones que mejoren la rentabilidad, lo que se está haciendo es seleccionar un portafolio. En el caso de inversiones, se pretende que las pérdidas de una acción se compensen con las ganancias de otra (Vélez, 2003; Wilmott, 1998).

En la actualidad, la aparente recuperación económica y el hecho de que la demanda incrementó más del 3% anual en el último año (ISA, 2003), cabe preguntarse cómo responderá el SIN para satisfacer futuros crecimientos, dadas las condiciones difíciles que actualmente caracterizan el negocio, tales como el precio actual de Bolsa (ISA, 2003). La vulnerabilidad del sistema es dinámica, y no sólo depende de las condiciones hidrológicas y la tasa de crecimiento de la demanda, sino también del aumento de la capacidad instalada de generación (Calle, 2001).

La necesidad de incrementar las alternativas para generación de energía en Colombia parecería no ser una prioridad bajo las condiciones actuales, pero es una necesidad en el mediano plazo. Entre los proyectos de gran envergadura se encuentra Porce III, iniciativa de EEPPM., que tendrá una capacidad instalada de 660 MW; también está la posibilidad de que esta empresa construya un Parque Eólico de mayor capacidad, según los resultados del

Parque Piloto Jepírachi. Debe tenerse en cuenta que el país tiene un potencial estimado en capacidad eólica de 5000 MW en la región de la Guajira (Dinero, <en línea>, 2004).

### 3.4 COMPLEMENTARIEDAD HIDRÁULICA-EÓLICA

Ya se mencionaron las ventajas que representa la generación eólica, especialmente cuando se opera conjuntamente con sistemas hidráulicos: particularmente EEPPM. podría en el largo plazo aprovechar la complementariedad hidrológica entre los vientos de la Alta Guajira, con la hidrología de su sistema. Ver Figura 1. (COLCIENCIAS, EEPPM., Universidad Nacional; 2003).

De esta forma la empresa tendría la oportunidad de generar energía con una tecnología, cuando se presenta escasez del recurso de la otra; por ejemplo, la planta eólica producirá más energía durante los períodos de disminución de la generación hidráulica, en una estación seca.

La utilidad de operar en condiciones de complementariedad entre las tecnologías que conforman un Portafolio Tecnológico, ha sido objeto de estudio para aprovechamientos Hidráulicos-Eólicos en algunas zonas de Brasil (Odilon et al, 2001) y de Canadá (Bélanger y Gagnon, 2002), comprobando las ventajas de una operación conjunta entre estas. Los beneficios incluyen, desde proporcionar beneficios durante la operación diaria, hasta la operación de largo plazo. Combinando fuentes intermitentes con tecnologías de almacenamiento se extienden las horas de operación diaria y se mejora su valor como generadoras eléctricas despachables (OSTP, <en línea> 1997).

La energía eólica no aporta firmeza al sistema por sí sola, dadas las características intrínsecas de su tecnología y combustible (Odilon et al, 2001.). La variación en la velocidad del viento y la dificultad en su predicción, causan una gran incertidumbre sobre la cantidad de energía que pueda generar una planta de este tipo. Así mismo, se muestra que para compensar las fluctuaciones de corto plazo de las centrales eólicas, otras plantas deberían aumentar o disminuir su generación rápidamente, y se propone

que ese respaldo sea aportado por capacidad hidráulica (Bélanger y Gagnon, 2002).

#### **4 EVALUACION DEL RIESGO PARA UNA EMPRESA**

En el sentido financiero, el Riesgo se explica en términos de la incertidumbre de los resultados futuros. Entre los riesgos a los que se enfrentan los generadores de energía está el que no puedan cumplir los contratos que hayan firmado con la consecuente exposición a Bolsa (precios altos, gran variación de precios).

El riesgo se define como la Desviación Estándar de los rendimientos de un activo o inversión, y es muy utilizada para indicar la dispersión de un conjunto de datos, debido a que se expresa en las mismas unidades de la media (Enerbiz, 2001). El término “riesgo” sugiere definir y cuantificar el balance desconocido riesgo/retorno que cambia en función del movimiento del portafolio, debido a los cambios en precios, volatilidad, tasas de interés, y otras variables de mercado (Pilipovic, 1998).

La Diversificación consiste en seleccionar un portafolio de varios activos, con el fin de reducir el riesgo de estos, sacrificando rentabilidad (Enerbiz, 2001). Diferentes combinaciones de activos, como pueden ser las diferentes alternativas de generación de electricidad de EEPPM., constituyen un Portafolio tecnológico, cuya operación representa ingresos y costos para la empresa. Una vez se calcula la rentabilidad en un período puede analizarse el riesgo en que se incurrió en ese lapso.

El VaR es un método para calcular y controlar la exposición al riesgo en un mercado en general (Enerbiz, 2001). Resulta adecuado para medir la exposición a compras en Bolsa, a las que EEPPM. se vea forzado según una hidrología y condiciones de mercado dadas. El VaR se define como el límite superior de un intervalo de confianza para las pérdidas de un portafolio (Enerbiz, 2001; Leong y Siddiqi, 1998).

#### **5 MODELAMIENTO DEL PORTAFOLIO**

La liberalización de los mercados enfrenta a las empresas que participan de ellos a nuevos retos, las tradicionales formas de administrar, y de ejecutar la planeación se tornan obsoletos y no responden a las necesidades planteadas por el mercado. El nivel de incertidumbre se incrementó, así que la optimización y el “modelamiento duro” debieron complementarse con otros métodos de planeación tales como simulación (Dyner y Larsen, 2000; Dyner y Larsen, 1999).

La complejidad que adquieren los mercados hace que la planeación tradicional, basada en la búsqueda de óptimos para el mercado, óptimos para la operación de una empresa, etc., no sean adecuados cuando se trata de comprender las variables de un sistema en competencia, como es el caso del SIN con las tecnologías hidráulica y térmica.

La introducción de la generación eólica trae consigo muchos interrogantes acerca del impacto que el desempeño de la tecnología tendrá en el MEC. Sin embargo, con la diversificación en la generación de energía eléctrica se espera poder atender de una forma más confiable la demanda, aún con la ocurrencia de

fenómenos extremos, como es el Niño. Sin embargo debe estudiarse el desempeño de esta tecnología, las consecuencias que sobre el mercado de energía tendrá su operación, su posible impacto directo sobre las tecnologías predominantes hidráulica y térmica.

En ese orden de ideas, el entendimiento del Sector Eléctrico Colombiano (SEC) con la incorporación de la generación eólica podría lograrse mediante Dinámica de Sistemas (DS), teniendo en cuenta sus características: alta incertidumbre, un esquema de libre competencia que apenas se está consolidando, necesidad de nuevas formas de planeación diferentes a las tradicionales. Para evaluar posibles políticas bajo complejos ambientes, cuando los tradicionales enfoques de optimización y econometría están perdiendo su relevancia ante la liberalización de mercados, el modelamiento en DS se ajusta a los nuevos requerimientos (Dyner y Bunn, 1997; Dyner y Larsen 2000).

#### **5.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO: DIAGRAMA CAUSAL**

El modelamiento en DS permite tener en cuenta las interacciones entre las variaciones climáticas, la potencial complementariedad hídrica-eólica, los posibles retardos en la inversión, y en general, la realimentación propia entre las variables del sistema conformado.

El modelo en DS permite analizar las ventajas y desventajas de la diversificación de alternativas de generación eléctrica de una empresa (o Portafolio de Generación de electricidad), con una componente de energía eólica de capacidad importante (300MW). A continuación se describen las variables más importantes utilizadas en el modelamiento (Ver Figura 2):

- Ventas: representa las ventas de energía de EEPPM., en Contratos o ventas en la Bolsa de energía. Luego de hacer el Balance correspondiente, descontando los costos de operación se obtienen los Ingresos.

- Ingresos: calcula la diferencia entre las Ventas de EEPPM. y los costos en que la empresa incurre, relacionados con la generación de energía. Cuando la empresa haya cubierto todas sus obligaciones, entre las que se cuentan sus costos operativos; Administración Operación y Mantenimiento (AOM), pago de amortizaciones, etc. A partir de sus ingresos, EEPPM. puede planear expandir su Portafolio Tecnológico, teniendo en cuenta otros factores como el Riesgo y el VaR, para determinar sus políticas de administración o Manejo del Portafolio (de acuerdo con su aversión o tolerancia al Riesgo).

- El Manejo del Portafolio contempla la política de expansión del mismo, considerando las metas de EEPPM., su aversión o tolerancia al Riesgo, la medida de Valor a Riesgo (VaR) de sus compras de energía, y el porcentaje de los ingresos destinado a la construcción de nuevas plantas o Inversión en Generación.

- La Inversión en Generación aumenta la capacidad instalada en las tres tecnologías que conforman el Portafolio. Segundo el escenario climático que se presente se obtiene una energía disponible para ofertar en el mercado colombiano de energía.

- La variable Despacho de energía, genera la realimentación entre el Portafolio de EEPPM. y el resto del Mercado, según la

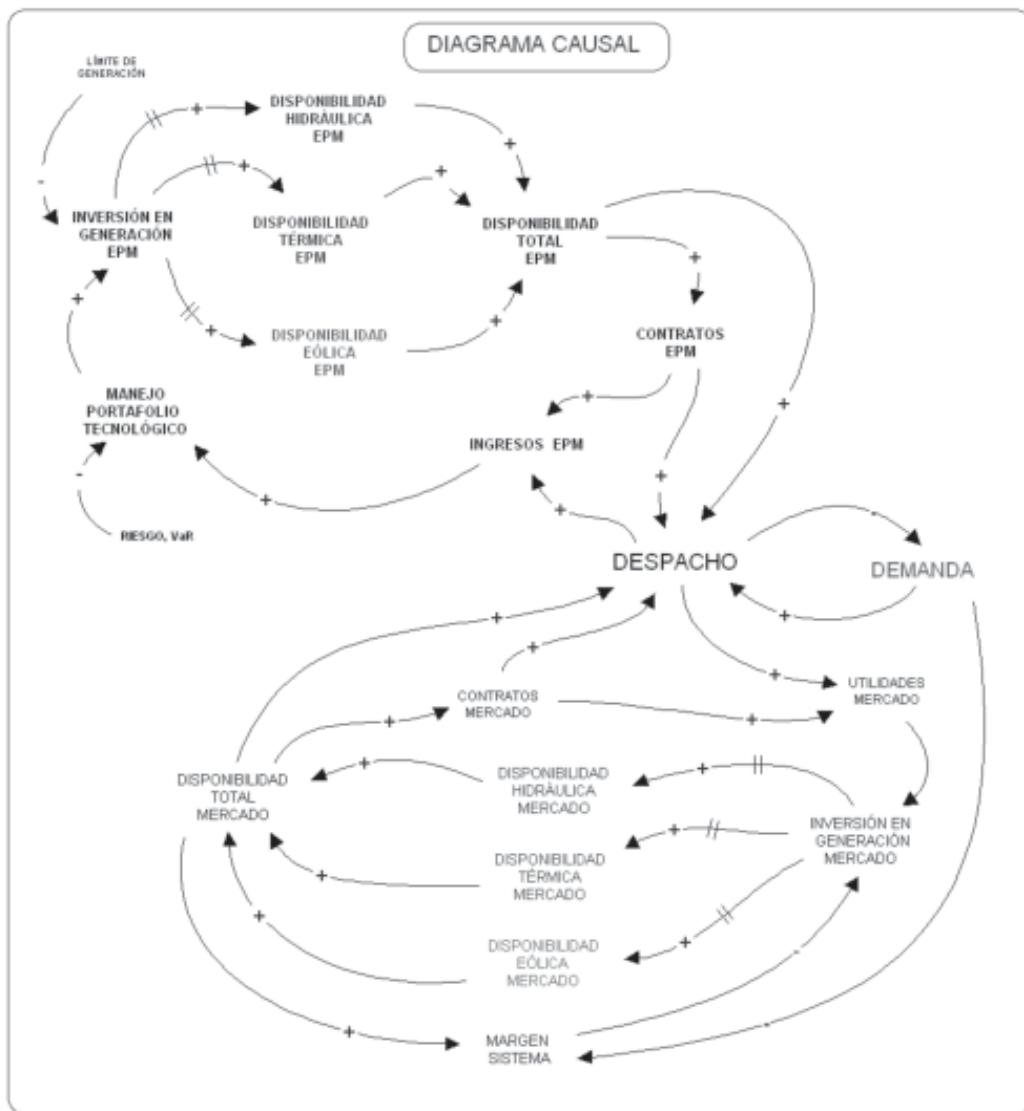


FIGURA 2. Modelamiento del Portafolio de Generación de EPM, frente al Resto del Mercado.

correspondiente porción de Demanda que le corresponde suplir a cada agente.

- A partir del Despacho de energía, se conoce si una empresa como EEPPM. cubrió totalmente sus
- Contratos de energía, o si debió comprar o vender energía en la Bolsa.
- De acuerdo a la energía vendida en Bolsa y Contratos, pueden ser calculadas las Utilidades de todas las empresas generadoras, entre ellas las de EEPPM.

A continuación se ilustran los módulos principales del modelo.

### 5.1.1 Módulo de hidrología.

Tiene en cuenta la hidrología histórica de los principales ríos del SIN, la influencia de los fenómenos de el Niño y la Niña, el ciclo

anual hidrológico, y los perfiles mensuales de viento en la zona del parque eólico.

### 5.1.2 Módulo de Oferta.

La oferta evoluciona con base en el tipo de estación climatológica por la que se atravesie, bien sea Niño o Niña. Se consideran las centrales hidráulicas y térmicas más importantes del sistema de generación nacional, y el parque eólico.

### 5.1.3 Módulo de Demanda.

Se suponen tres escenarios de crecimiento de la demanda energética nacional, con base en las expectativas futuras de crecimiento del país. Los escenarios del posible crecimiento, según el Producto Interno bruto (PIB) son:

Escenario 1: Estabilidad macroeconómica, el país está en paz y el PIB crece 4.5% anualmente. La disponibilidad de gas es firme

por que los mercados están en capacidad de proveer los recursos necesarios.

Escenario 2: El país crece económicamente al 3% anual. La disponibilidad de gas es restringida

Escenario 3: Crecimiento del PIB 1.5% anual. Disponibilidad de gas incierta. No hay inversión extranjera

#### 5.1.4 Módulo de Precio de la Energía y despacho.

Simula el comportamiento de la Bolsa de energía en Colombia y el despacho por méritos, efectuando el ordenamiento de las centrales y tecnologías despachadas según su precio de oferta; para finalmente encontrar el marginal o precio de Bolsa.

Dada la posible regulación que cobijará el despacho de energía del Parque Eólico, éste sale en la base del despacho

#### 5.1.5 Módulo de Expansión.

Incluye las plantas más importantes en construcción, con fechas posibles de entrada. Teniendo en cuenta las demás variables involucradas, pueden evaluarse políticas para la expansión del parque eólico, en cuanto a diferentes tamaños y posibles años de entrada al SIN, permitiendo evaluar el efecto de esto en el mercado.

### 5.2 VALIDACIÓN DEL MODELO

Para la validación de este modelo, se analizan los comportamientos y resultados arrojados por éste, comparando las series generadas por el modelo, con las series reales de precios y generación desde Agosto de 1997.

#### 5.2.1 Precio de Bolsa

Los precios de Bolsa del modelo y los Precios Reales de Bolsa están en precios constantes del 2003.

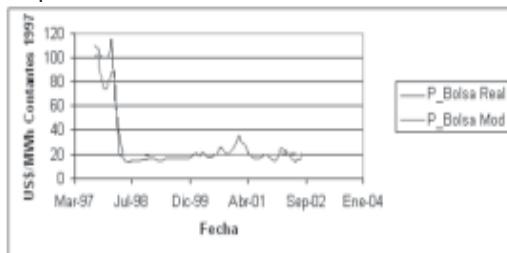


Figura 3. Precio de Bolsa: Real y Modelado

El precio de Bolsa arrojado por el modelo se compara con el precio de Bolsa real, tal como se ve en la Figura 3. El precio de Bolsa arrojado por el modelo y el precio de Bolsa real presentan comportamientos muy similares y la magnitud de la diferencia entre los dos precios es muy pequeña, por lo cual se puede concluir que el modelo está representando bien la formación del precio de Bolsa.

#### 5.2.2 Generación de EEPPM.

La tendencia de la generación de EEPPM. está de acuerdo con la que sucedió en la realidad en el período en estudio. Hay una diferencia promedio mensual del 24% en la generación que el modelo entrega, pero se considera satisfactoria la representación (Ver Figura 4).

Se concluye que el modelo representa de forma adecuada las variables consideradas en el modelamiento para representar la operación del Portafolio de Generación de EPM.

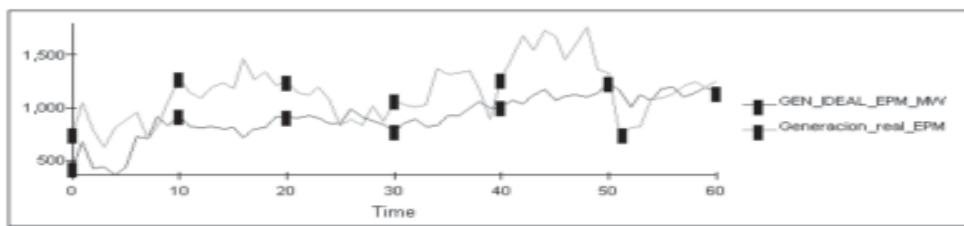


Figura 4. Generación de EPM. Real y Simulada.

### 5.3 RESULTADOS

La generación ideal de EEPPM. disminuye dramáticamente cuando se está en un período de Niño, y a medida que se restablece la normalidad en los aportes hídricos, los niveles de los embalses, etc. Además, la generación total de la empresa también aumenta, ya que se trabaja con el supuesto de que Termos Sierra aporta generación desde que ingresa al sistema.

La generación eólica aporta mayor cantidad de energía, aumentando la generación total de EEPPM. en 5%, como se observa en la Figura 5, a su vez disminuye la generación hidráulica.

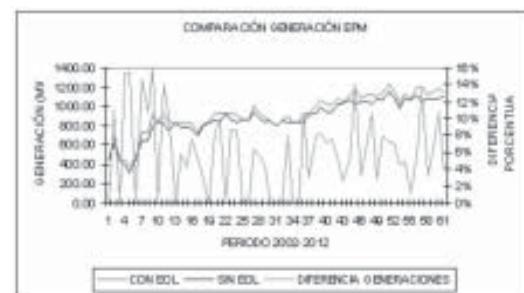
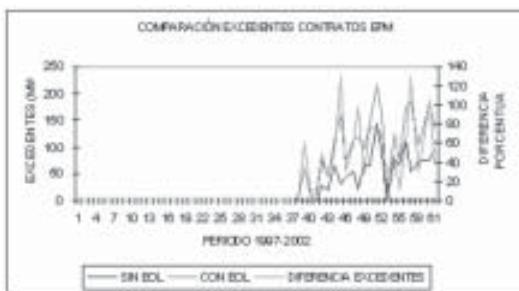


Figura 5. Comparación generación EPM. Sin/Con Eólica

Una vez cubiertos los contratos de EEPPM., la empresa puede vender sus excedentes en la Bolsa. Por esto el aumentar la generación de energía con eólica, significa incrementar los ingresos que percibe (Ver Figura 6).

De lo anterior se desprende que, gracias a la generación eólica, puedan evitarse compras en Bolsa, en momentos de alto precio y a su vez se tenga la posibilidad de vender en tal situación. En la simulación se obtiene una reducción del 13% en las compras en Bolsa (Figura 7).



**Figura 6. Comparación excedentes contratos EPM. Sin/Con Eólica**



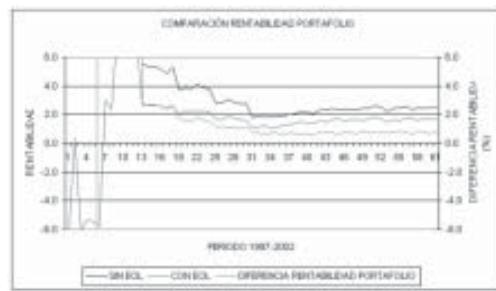
**Figura 7. Comparación compras en Bolsa EPM. Sin/Con Eólica**

El Riesgo de la empresa disminuye cuando se tiene generación eólica. El mayor volumen de generación, que se traduce en una mayor posibilidad de ventas de energía con el Parque Eólico, implica un menor riesgo de incumplir los contratos firmados. Ese Riesgo bajaría en promedio 24 puntos, incluso en los primeros meses bajó más de 100 puntos, teniendo en cuenta que el Perfil de Contratación se mantuvo constante a través del período de simulación. Ver Figura 8.



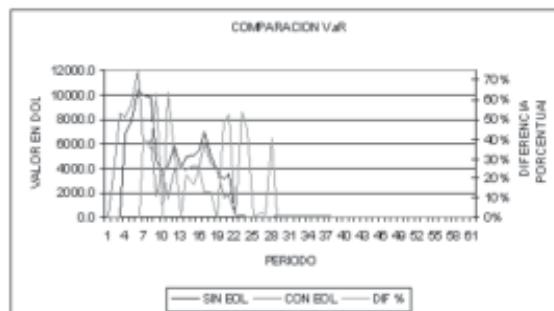
**Figura 8. Comparación Riesgo EPM. Sin/Con Eólica**

Se observa que la Rentabilidad del Portafolio de EEPPM. es menor con la inclusión de la eólica, pero debe notarse que la empresa debe asumir la amortización del parque y sus costos asociados (Figura 9). Durante el Niño, el cambio fue drástico en la Rentabilidad, así también durante el período de normalidad hidrológica presentándose reducciones, aunque no tan notables. En el período de niño (primeros 8 meses de la simulación) la Rentabilidad bajo más de 100 puntos, y posterior a este fenómeno bajó entre 1 y 3 puntos, con la incorporación de la eólica.



**Figura 9. Comparación generación EPM. Sin/Con Eólica**

EL VaR calculado en el modelo representa la máxima pérdida en que incurría el portafolio de EEPPM., al tener que cubrir un déficit de energía comprando en Bolsa. En la Figura 10 se observa como a principios del período considerado, que corresponde a los meses de Niño, el VaR es alto, incluso con la entrada de la eólica. Terminada la sequía, el VaR de compras en Bolsa disminuye y más todavía cuando se cuenta con la generación eólica. En síntesis, hay un menor VaR para las Compras en Bolsa, cuando se cuenta con energía eólica.



**Figura 10. Comparación VaR EPM. Sin/Con Eólica**

## 6 CONCLUSIONES

Considerar la energía Eólica como una alternativa para la contratación puede resultar conveniente para EEPPM., en la medida en que la generación de la tecnología pueda utilizarse en períodos de déficit, gracias a la complementariedad, o para ofertarla en Bolsa, obteniendo altos precios.

A pesar de que la Rentabilidad del Portafolio disminuye con la incorporación la eólica, también así el Riesgo en el mismo.

El VaR de las Compras en Bolsa se reduce de forma importante, especialmente durante el Niño, EEPPM. no se vería forzado a las costosas compras en Bolsa en momentos de sequía, que afectan disminuyendo la rentabilidad de su negocio de generación.

Gracias al modelamiento en DS es posible considerar la expansión eólica desde una perspectiva conjunta entre disponibilidad energética, ventajas económicas y complementariedad con otras fuentes.

La simulación en DS con la que se representó el portafolio, contribuye al entendimiento de las posibilidades de la tecnología eólica dentro del Portafolio Tecnológico de EEPPM., y a su vez,

en el estudio de los posibles impactos de dicha tecnología sobre las plantas hidráulicas y la térmica ya existentes dentro de él.

Es necesario continuar investigando sobre las posibilidades de la energía eólica en Colombia, así como las oportunidades de otras tecnologías alternativas, que eventualmente beneficiarían al sistema nacional, así como podrían proporcionar firmeza a los portafolios de las diferentes empresas.

## 7 AGRADECIMIENTOS

Se expresan sinceros agradecimientos a la Subgerencia de Planeación en Generación de Energía de EEPMM, especialmente al doctor Luis Carlos Rubiano, y a los ingenieros Luis Fernando Rodríguez, Oscar Fernández y Walter Navarro, por su valiosa participación en el proyecto “El mercado de la energía eólica en Colombia”.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

ADIE-ASOCIACIÓN DANESA DE LA INDUSTRIA EÓLICA. [www.windpower.org](http://www.windpower.org). Consultado en Febrero de 2003.

BÉLANGER, Camilla y GAGNON, Luc. “Adding wind energy to hydropower”. Energy Policy Volumen 30. 2002 pp 1279-1284.

CALLE D'ALEMAN, Rafael Darío. Opciones de Regulación en el Mercado Eléctrico Colombiano. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Tesis para optar por el título de Master en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Facultad de Minas. 2001.

COLCIENCIAS, EE.PP.M., Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Instituto de energía. Proyecto “El mercado de la energía eólica en Colombia: Operación, riesgo y posibilidades de expansión. 2003.

CONCHA, Ismael y JAIMES, Gilberto. “Energía y Cambio climático, la situación de Colombia frente al Protocolo de Kyoto”. En: Revista Energética. Edición 22. 1999. c. pp 22-39.

DINERO. “Viento a favor”. En línea: [http://www.dinero.com:8080/larevista/169/NEGOCIOS\\_02.asp](http://www.dinero.com:8080/larevista/169/NEGOCIOS_02.asp). Consultado en octubre de 2003.

DYNER, Isaac. “El mercado eléctrico colombiano: resultados, problemas y perspectivas”. En: Revista Energética edición 19. 1998. pp75-86.

DYNER, Isaac y BUNN, Derek W. “A system simulation platform to support energy policy in Colombia”. System Modelling for energy policy. Ed. John Wiley & Sons. Chichester. 1997. pp 260-271.

DYNER, Isaac y LARSEN Erik. “From planning to strategy in the electricity industry”. En: Energy Policy. Volumen 29. Número 13. 2000. pp 1145-1154.

DYNER, Isaac y LARSEN Erik. “To plan or not to plan”. Conferencia internacional de Análisis Energético. Medellín, 1999.

EE.PP.M.-EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN. Unidad estratégica de negocios generación energía. “Propuesta para

estructurar un programa de investigaciones, proyectos y actividades asociadas para el desarrollo de la energía eólica en Colombia”. Medellín. 2001.

EL-SAYED Mohamed A. H. “Substitution potential of wind energy in Egypt”. En Energy Policy Volumen 30. 2002. pp 681-687.

ENERBIZ. Taller de capacitación para la Comercialización de la electricidad en Colombia. ISA S.A. - Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 2001.

ITER-INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ENERGÍAS RENOVABLES. “Información general sobre energía eólica”. <http://www.ITER.es/download/e-eolica.pdf> Consultado en Enero de 2004.

ISA S.A.- INTERCONEXIÓN ELÉCTRICA S.A. [www.isa.com.co](http://www.isa.com.co). Consultado en Enero de 2004.

JAGADEESH, A. Wind energy development in Tamil Nadu and Andhra Pradesh, India institutional dynamics and barriers - A case study. 2000 En: Energy Policy. Vol 28 N 3. 157-168.

LEONG, Kenneth y SIDDIQI, Riaz. “Value at Risk for power markets”. En: Energy Risk Management, Peter Fusaro. Editorial McGraw-Hill. 1 Edición. 1998. pp. 157-178.

MONTOYA MORENO, Santiago y SMITH QUINTERO Ricardo. “Evolución del sistema de generación colombiano en ambiente de competencia”. En: Revista Energética Edición 18. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. pp 9-32. 1997.

OCHOA, Francisco. “La expansión eléctrica en el laberinto”. En: Revista Energética Edición 27. 2001. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. pp 11-19.

ODILON, A. C: do Amarante; SCHULTZ, Darío J.; BITTENCOURT, Rogério M. y ROCHA, Nelson A. “Wind/Hydro complementary seasonal regimes in Brazil”. 2001 DEWI Magazine 19.

OSTP. “Choices for a brighter future: The renewable electric technology portfolio. Abril 1997. y “opportunities to move forward”. En: <http://www.eere.energy.gov/power/pdfs/portfolio.pdf>. Consultado. Mayo de 2003.

PILIPOVIC, Dragana. Energy Risk. Editorial MacGraw-Hill. 1 edición. 1998. 248p.

PINILLA, Alvaro. “Manual de aplicación de la energía eólica”. Ministerio de Minas y Energía-INEA. 1997.

SANCLEMENTE, Carlos. Desarrollo y crisis del sector eléctrico colombiano 1890-1993. Empresa editorial Universidad Nacional. 1 Edición. 1993. 138 pág.

UMAÑA ECHAVARRIA, Alejandro, “Análisis de escenarios para la implantación de energía eólica en Colombia”. Universidad de los Andes. 2000. 82p.

VELÁSQUEZ, Jesús M. “El racionamiento de 1992: ¿Escasez

de recursos o escasez de gerencia? En: Revista Mundo Eléctrico Colombiano. Volumen 16, Número 47. 2002. pp 41-45.

VÉLEZ PAREJA, Ignacio. "Decisiones empresariales bajo Riesgo e incertidumbre" Grupo editorial Norma y Editorial Politécnico Grancolombiano. 2003. 448 p.

WILMOTT, Paul. Derivates. Editorial John Wiley & Sons. University Edition. Chinchester. 1998.

YUE, C-D, Liu C-M, LIOU E. M. L. A transition toward a sustainable energy future: feasibility assessment and development strategies of wind power in Taiwan. 2001. En: Energy Policy. Volumen 29 Número 12. 951-963.