

# ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LAS RESTRICCIONES DEL SNI EN EL PRECIO DEL MERCADO OCASIONAL

**José Oscullo**  
Dirección de Planeamiento

**Luis Armas**  
Dirección de Operaciones

## RESUMEN

En la actualidad; la operación de los mercados de energía eléctrica atraviesa una profunda reestructuración; debido especialmente a las transacciones entre los diferentes agentes a través del sistema de transmisión. Operar de manera eficiente y segura un sistema eléctrico, hace necesario la utilización de una serie de servicios; los mismos que elevan el costo de operación del sistema. Esto ha llevado a la creación de mercados específicos para proporcionar dichos servicios.

Si los precios de la energía son obtenidos aplicando la teoría marginalista, este precio se ve afectado por la operación diaria del sistema para cumplir con un conjunto de restricciones.

En el presente trabajo, se realiza una estimación de estos costos adicionales y el análisis de su influencia sobre el valor del precio de la energía en el SNI; los mismos que afectan las transacciones entre los diferentes agentes; de manera tal de identificar los elementos que permitan una implementación económica-social práctica en un mercado eléctrico.

**PALABRAS CLAVE:** Precio Spot, Mercados de Energía, Optimización Matemática.

## 1. INTRODUCCIÓN

La reestructuración, en el sector eléctrico hizo necesario un nuevo ordenamiento jurídico-institucional. La idea modernizadora en los diferentes mercados de energía eléctrica; es la separación entre el producto<sup>1</sup> y el servicio<sup>2</sup>. Al contrario de lo que existía empresas monopólicas, en esta nueva estructura pasan a existir empresas que dan servicio ya sea en generación, distribución y la comercialización de la energía; lo cual ha posibilitado la competencia dentro del mercado.

En la mayoría de los países cuyos sectores eléctricos se han reestructurado, la energía pasa a ser comercializada como un producto.

1. Se considera la energía eléctrica como un bien de consumo.  
2. Elementos de transmisión, distribución y control del sistema

El despacho de los recursos del sistema es realizado con criterios comerciales, derivándose del mismo el precio del producto energía eléctrica en el mercado de corto plazo "precio spot"; los mismos que se forman por la suma de los costos marginales de la generación, transmisión y servicios auxiliares.

Los costos marginales constituyen señales económicas referentes a cada una de las etapas del proceso productivo, teniendo la influencia respectiva en el precio final de la energía eléctrica. Dentro de estos costos el más representativo es el obtenido en el despacho económico, esto es, el costo marginal de generación, por medio del cual es posible analizar la influencia ejercida por la adopción de una política operativa (consideraciones de calidad y seguridad).

El despacho de los recursos en un sistema hidrotérmico al menor costo posible, no necesariamente, son respetadas las restricciones asociadas a la calidad y seguridad impuestas por los recursos del sistema en el corto plazo (operación eléctrica) y el mediano plazo (operación energética).

En el fondo resolver el problema de despacho consiste en descomponerlo en una serie de sub-problemas de despacho para cada instante de tiempo  $t$ , coordinados entre sí de modo de atender la meta energética impuesta en cada central hidráulica, los límites operacionales del sistema de transmisión.

## 2. PRECIO SPOT [1,6]

Para un sistema eléctrico de potencia, el precio spot depende del estado del sistema, esto es, de las condiciones de abastecimiento de la demanda en la hora  $t$ . Luego para una hora  $t$  el precio spot se define como:

$$Q_k(t) = \frac{\partial [\text{Costo total de abastecimiento de energía eléctrica al consumidor en la barra } k]}{\partial d_k(t)} \quad (1)$$

### 2.1 Componentes del Precio Spot

El precio spot asociado al consumidor en la barra  $k$

durante la hora  $t$ , es obtenido como la suma de una serie de componente definidos en la ecuación (2):

$$\rho_k(t) = Y_c(t) + Y_M(t) + Y_{QS}(t) + Y_R(t) + \eta_{L,K}(t) + \eta_{QS,K}(t) + \eta_{R,K}(t) \quad (2)$$

Donde los costos marginales:

$Y_c$  = (generación) relacionado con los combustibles.

$Y_M$  = (generación) relacionado con el mantenimiento.

$Y_{QS}$  = (generación) relacionado a la calidad del abastecimiento.

$Y_R$  = (generación) relacionado al costo de capital.

$\eta_{L,K}$  = (transmisión) referente a las pérdidas.

$\eta_{QS,K}$  = (transmisión) referente a la calidad del abastecimiento.

$\eta_{R,K}$  = (transmisión) referente al costo de capital.

### 2.1.1. Restricciones de Seguridad

En estudios de corto plazo, adicional a los aspectos económicos, es de suma importancia asegurar que la operación del sistema eléctrico sea realizada con niveles mínimos de calidad y seguridad.

La capacidad de un sistema de abastecer la demanda, aún se presente un escenario diferente al previsto definirá el nivel de seguridad que se desee obtener; en este estudio no se considera medidas que garanticen la confiabilidad del sistema. Si no se considera el análisis de seguridad que permita cumplir con niveles adecuados de calidad en el abastecimiento de la demanda, cumpliendo las restricciones operacionales de los recursos del sistema de generación y transmisión.

Las restricciones del sistema de transmisión son consideradas por medio de un flujo de potencia DC por medio de la ecuación (3):

$$f = D * p \quad (3)$$

Donde:

$F$  = Vector de flujos de potencia activa por lo elementos del sistema de transmisión.

$P$  = Vector de inyecciones de potencia activa (generación y carga).

$D$  = Matriz de participación, cuyos elementos de la  $i$ -ésima columna, define la contribución de las barras de generación (excepto la slack) y de carga presentes en el sistema; en la composición del flujo de potencia activa en el  $i$ -ésima fila (elementos del sistema de transmisión).

$$D = X^{-1} A^T [A X^{-1} A^T]^{-1} \quad (4)$$

$X$  = Matriz reactancia (matriz diagonal cuyos elementos constituyen la reactancia total del  $i$ -ésima barra).

$A$  = Matriz de incidencia cuyas líneas corresponden a las barras y las columnas a las líneas del sistema de transmisión.

Así, la matriz  $D$  depende únicamente de los aspectos físicos del sistema de transmisión, esto es, de la topología del sistema.

Como se indica en la ecuación (2) el costo marginal de la operación ( $\lambda = Y_c(t) + Y_M(t) + Y_{QS}(t)$ ); depende del despacho sin la consideración de las restricciones del sistema de transmisión. Los componentes del sistema de transmisión pérdidas (depende del uso del sistema de transmisión); la de calidad del abastecimiento únicamente se presenta cuando se viola los límites impuestos en los elementos de la red de transmisión y en que nivel se sobrepasa los mismos.

### 2.1.2. Impacto Económico de las Restricciones del Sistema de Transmisión

El sistema de transmisión en la estructura del mercado constituye un servicio necesario y de libre acceso, requisito indispensable para el desarrollo y operación de un mercado competitivo. Debido al hecho de que la transmisión desempeña el papel de un agente económico que permite al Operador del sistema seleccionar los generadores más eficientes para abastecer el mercado, de esta manera el consumidor disponga de energía al menor costo posible.

No obstante, el funcionamiento del sistema de transmisión y requisitos de seguridad en el sistema; imponen restricciones al despacho de la manera más eficiente posible lo que provoca un incremento en el costo de operación, sin la presencia de estas restricciones la generación atendería al mercado a un único precio, es decir, existiría el mercado perfecto con una elevada competencia entre los generadores.

Considerar la red de transmisión por medio de un flujo de potencia DC, es relativamente simple ya que posibilita la simulación de inyección de potencia

activa en algún punto del sistema dentro del cual la red modifica la operación de corto plazo. La limitación de la capacidad del sistema de transmisión restringe el movimiento de energía lo que impone un costo marginal, y hace que ciertas barras del sistema presente precios mayores para reducir este efecto es necesario redistribuir los flujos de potencia (despacho).

### 3. ESTUDIO

El análisis de las diferentes componentes del precio spot, se obtendrán de un sistema electro-energético equivalente del Ecuador (Figura 1).

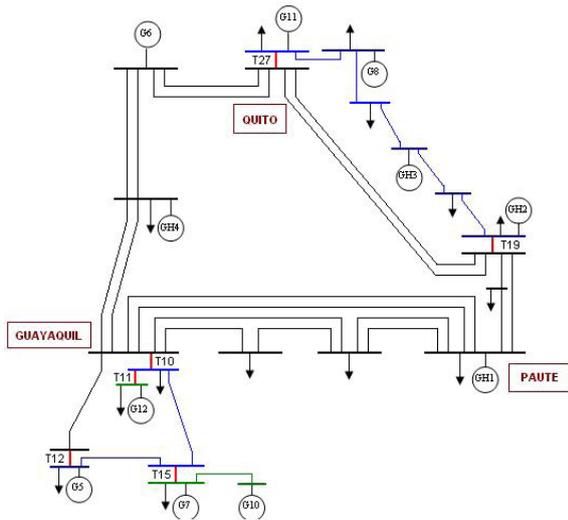


FIGURA 1: SNI Equivalente

En un mercado tipo Pool, el objetivo es obtener el mínimo costo de operación; el operador del sistema define el despacho óptimo llevando en consideración las restricciones del sistema y con el objetivo de obtener el mínimo costo.

En MATLAB®, se implementó el algoritmo para resolver el despacho hidrotérmico considerando la red de transmisión, donde se implemento el cálculo de las diferentes componentes del precio spot. El despacho, se consideró con una discretización horaria para el período de 24 horas.

Para analizar la influencia del sistema de transmisión, en el precio spot, se considera:

- El sistema de transmisión no presenta restricciones para obtener el despacho de mínimo costo; lo que se denominará “Despacho Irrestringido”.
- Las restricciones del sistema de transmisión; obteniéndose un “Despacho Restricto”.

### 3.1. Condición Hidrológica Alta

El sistema ecuatoriano para una condición hidrológica alta, presenta las restricciones en su sistema de transmisión, debido a la muy limitada generación térmica requerida.

En la Figura 2, se presenta la demanda total del sistema para un día laborable, para lo cual se obtiene el despacho de de las unidades del sistema equivalente como se observa en la Figura 3.

En los despachos, se muestra la variación en la generación de las unidades; para cumplir con las restricciones impuestas por el sistema de transmisión, existiendo una redistribución en el despacho como se observa en la Figura 3.b.

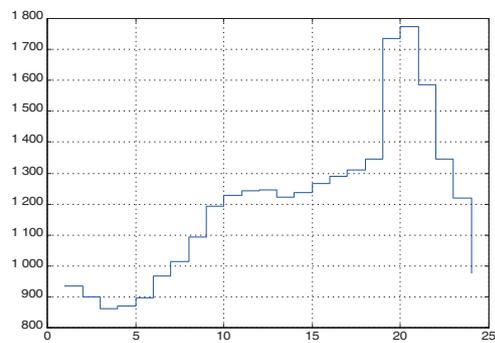
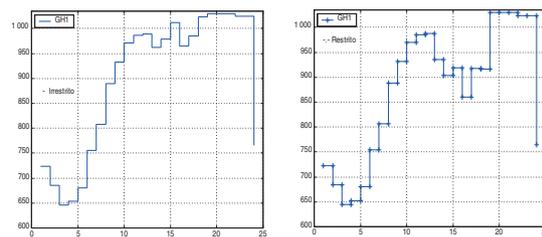
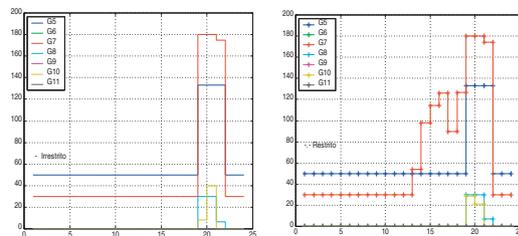


FIGURA 2: Demanda Total (Día Laborable)



(a) Hidráulico

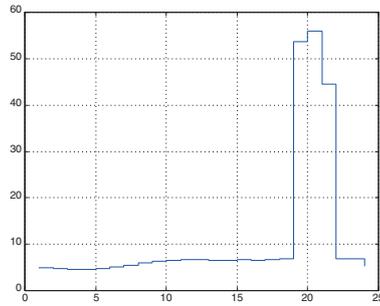


(b) Térmico

FIGURA 3: Despacho de las Unidades de Generación

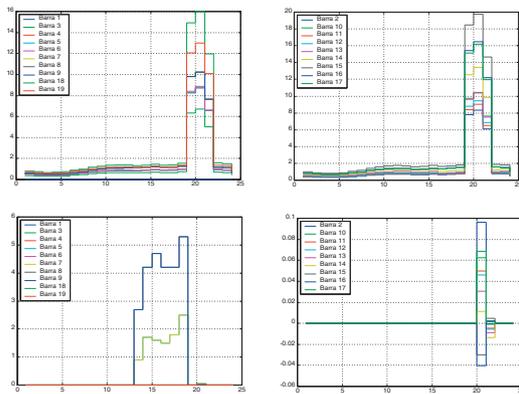
A continuación en la Figura 4, se presenta las

diferentes componentes del precio spot; el costo marginal de operación presenta una variación similar a la demanda.



(a) Costo Marginal de Operación

Los componentes debido al uso y las restricciones del sistema de transmisión se muestran a continuación:



(b) Costo Marginal del Sistema de Transmisión

FIGURA 4: Componentes del Precio Spot

Con la información de la Figura 4; se obtiene el precio spot para todas las barras del sistema, nótese como las barras que poseen generación hidráulica posee un precio inferior; que las correspondiente a las barras con generación térmica.

Tal situación ocurre porque las unidades térmicas comienzan a operar económicamente cuando el valor de la energía es igual o mayor al costo marginal de la unidad, caso contrario opera fuera de despacho; ya sea por características de la unidad o para solventar restricciones del sistema de transmisión.

Las barras 5, 6 y 7 correspondientes a la zona Pascuales-Salitril, presentan los precios más elevados, debido a que cuentan con un sistema de transmisión saturado Figura 5.

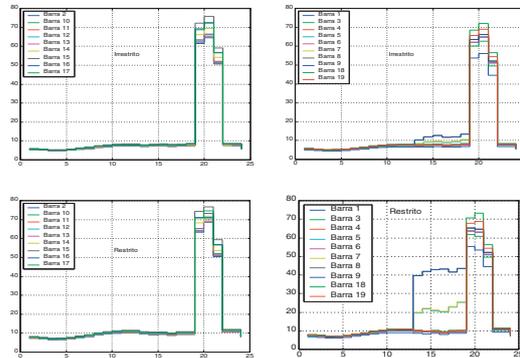


FIGURA 5: Precio Spot del Sistema

### 3.2. Condición Hidrológica Alta – Mantenimiento de los Circuitos Molino-Pascuales

Considerando la misma demanda del sistema, más con una consideración operativa debido al mantenimiento de los circuitos Molino-Pascuales

Es necesario restringir la operación de la Central Hidropaute, a continuación se muestran las componentes del precio spot para el caso de considerar o no las restricciones del sistema de transmisión Figura 7;

Y, en la Figura 8, se observa el precio spot para cada barra del sistema.

Los despachos de los recursos de generación, considerando la topología hace necesario el incremento de generación térmica en la zona Pascuales-Salitril Figura 6. Por las condiciones del despacho, el costo marginal de operación presenta fuertes variaciones Figura 7a.

La redistribución de generación modifica el flujo del sistema de transmisión, lo que afecta el uso de los diferentes elementos.

El cambio en la impedancia de los elementos que unen la Central Hidroeléctrica Paute con la zona de Pascuales hace que se degrade el perfil de voltaje, lo que a su vez incrementa la corriente y por las leyes de Kirchoff.

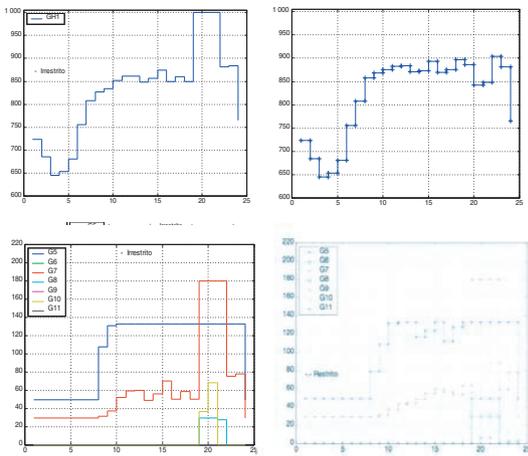
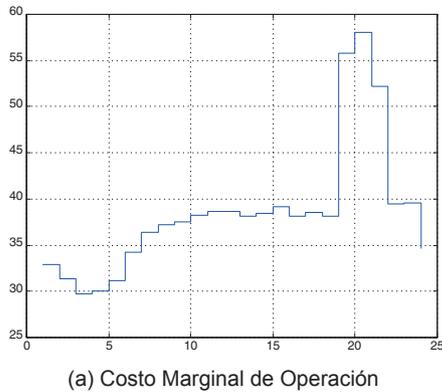
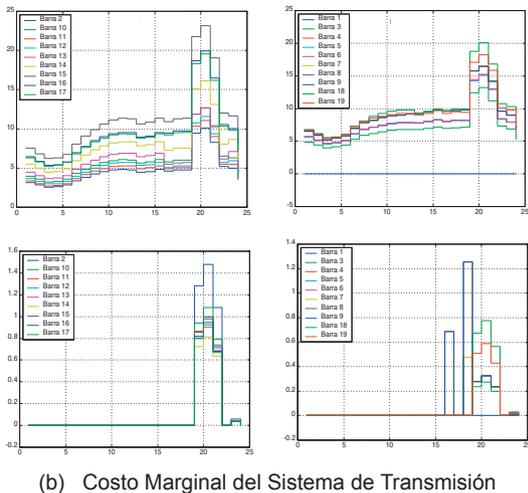


FIGURA 6: Despacho de las Unidades de Generación



(a) Costo Marginal de Operación



(b) Costo Marginal del Sistema de Transmisión

FIGURA 7: Componentes del Precio Spot

Respecto a la topología anterior, existe nuevos elementos del sistema de transmisión que presentan violación en los límites; lo que afecta directamente a la componente de calidad del servicio de la red de transmisión.

El precio spot obtenido con la ecuación (2), presenta

una elevación, así la barra de Ibarra (15) tiene el precio más alto, dando un incentivo para la generación o recursos para reducir el costo marginal del sistema de transmisión.

En la Figura 8, se muestra los precios Spot, donde la Zona Pascuales-Salitril presenta precios elevados, debido principalmente a las componentes dadas por el uso de la red de transmisión.

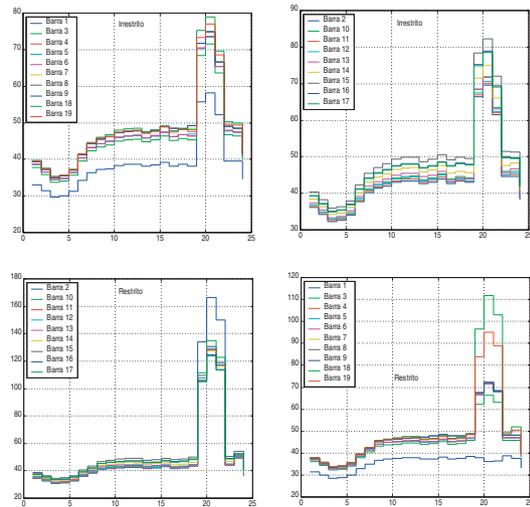


FIGURA 8: Precio Spot del Sistema

#### 4. COMENTARIOS

La obtención de los precios spot para cada barra utilizando la teoría marginalista, contribuye al eficiente uso de los recursos del sistema.

Las componentes que representan el costo marginal de la red de transmisión, es el producto de la desagregación espacial de los precios marginales de cada barra del sistema, así los ingresos variables se generan por la diferencia de los precios spot de cada barra el cual se obtiene por:

- El uso de los elementos del sistema de transmisión que se ve reflejado en las pérdidas, debido a la transferencia de energía entre generadores y consumidores.
- Las restricciones del sistema de transmisión, que al ser elementos físicos y por condiciones operativas hace que el despacho no sea "Estrictamente Económico"; esto a su vez produce una separación grande de los precios spot no solo en las barras de la zona afectada, sino, de otras zonas en teoría alejadas del problema, lo que muestra una clara señal de la expansión del sistema.

## 5. CONCLUSIONES

La sola aplicación de los precios spot dentro de un mercado de energía, no es suficiente, es necesario incluir reglas que permitan obtener una operación y entrega de energía a todos los participantes del sistema eléctrico. Porque caso contrario; es más económico incrementar las restricciones y así obtener precios elevados no solo en el área afectada sino en otras áreas del sistema.

Las restricciones de los recursos del sistema (generación-transmisión); poseen un fuerte impacto en el precio calculado por la teoría marginalista. Ya sea por condiciones no controlables, como es el caso de las condiciones hidrológicas; que hace transportar grandes bloques de energía de un lugar a otro; o por condiciones operativas normales (mantenimientos) que son necesarios por tratarse de elementos físicos, esto hace necesario crear procedimientos adicionales que permitan flexibilizar supuestas penalizaciones al administrador de una unidad de generación sistema de transmisión o distribuidor.

Así la realidad de cada país y por ende de cada mercado, hace que la sola aplicación de tal o cual teoría siempre tenga presente la realidad social y cultural de los entes al cual va dirigido.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] SCHWEPPE, M.; CARAMANIS, R.; TABORS, E.; BOHN, R.; Spot Price of Electricity; Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [2] SILVA, E.; Formação de Preços em Mercados de Energia Elétrica; 1 ed, SagraLuzatto, 2001.
- [3] TAPIA, K.; Impacto de las Restricciones de Transmisión en un Mercado Competitivo de Electricidad; Tesis de Maestría, Escuela de Ingeniería PUC-Chile, Febrero 1998.
- [4] ODÉRIZ, F.; Metodología de Asignación de Costes de la Red de Transporte en un Contexto de Regulación Abierta a la Competencia; Tesis de

Doctorado, ICAI-Universidad Pontificia Comillas-Madrid, Enero 1999.

- [5] OLIVEIRA, A.; Uma Metodologia para o Cálculo do Spot Price em Sistemas Hidrotérmicos; Tese de Mestrado, FEEC/UNICAMP, Agosto 1999.
- [6] OSCULLO, J.; Um Modelo de Pré-despacho com Gerenciamento de Congestionamento no Sistema de Transmissão; Tese de Mestrado, FEEC/UNICAMP, Fevereiro 2002.
- [7] WOOD, J.; WOLLENBERG, B.; Power Generation Operation and Control; John Wiley & Sons, 1996.



**José Oscullo Lala.-** Nació en Sangolquí, Ecuador, en 1971. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en 1996, y de Master en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Estatal de Campinas, Sao Paulo en 2002.

Actualmente está postulado para cursar la especialización de Economía y Finanzas en la Universidad Andina Simón Bolívar, Quito. Su campo de investigación se encuentra relacionado con la aplicación de sistemas expertos a mercados eléctricos, así como la regulación y economía de mercados.



**Luis Armas Vargas.-** Nació en marzo de 1980 en Quito –Ecuador. Cursó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional, obteniendo el título de Ingeniero Eléctrico en Agosto del 2005.

Actualmente, se encuentra laborando en la Dirección de Operaciones del Centro Nacional de Control de Energía – CENACE. Su campo de investigación es la Optimización de la Operación en Tiempo Real y Restablecimientos en Estados de Emergencia del Sistema Nacional Interconectado.