

TARIFACIÓN ÓPTIMA DE SERVICIOS DE TRANSMISIÓN EN UN MERCADO COMPETITIVO DE ENERGÍA

PARTE I: ELIMINACIÓN DE CARGOS POR CONGESTIÓN Y PÉRDIDAS

Gabriel Salazar
Dirección de Transacciones Comerciales

RESUMEN

Este artículo presenta un nuevo enfoque metodológico para la tarificación de la transmisión en mercados competitivos de energía eléctrica, considerando los costos de transmisión en la función objetivo de corto plazo del problema de despacho óptimo. La remuneración a la empresa de transmisión se propone mediante la diferencia de cobros y pagos a precios spot, de esa forma se persiguen los objetivos de distribuir los costos de transmisión en forma directa dentro del proceso de optimización en función del uso marginal que cada agente realiza de la red (factores de distribución) y, recuperar, a través de la diferencia de precios nodales, exactamente los costos de transmisión modelados en la FOCP [1].

Para lograr que la remuneración a la empresa de transmisión sea la requerida aún cuando se consideran pérdidas en la red y se activan restricciones de capacidad en las líneas de transmisión, se presentan dos métodos complementarios a la metodología de tarificación propuesta que logran eliminar las componentes debido a pérdidas y restricciones activas de transporte de la remuneración a la empresa de transmisión

PALABRAS CLAVE: Costos de Transmisión, Despacho Óptimo, Tarificación de la Transmisión.

1. INTRODUCCIÓN

En general en los sistemas eléctricos el transportista es considerado como un sector que es monopolio natural y con tasas de retornos garantizadas sobre su capital. En este contexto el transportista es indiferente sobre quién está utilizando su recurso. A lo sumo él trata de operar y mantener la red a mínimo costo y con poco incentivo por mejorar la calidad de su servicio [1].

Por otro lado, si la red no es remunerada convenientemente, de modo de asegurar la reposición de costos de inversión, operación y mantenimiento, la red no será ampliada en forma óptima y se volverá más insegura, aumentando la probabilidad de falla de sus componentes y por tanto los problemas de congestión. De aquí la necesidad de un esquema tarifario adecuado, ya que existe la necesidad de reconocer las grandes inversiones del sector y por otro lado es necesario enviar señales óptimas de precios de transmisión a todos los participantes del mercado de tal forma de incentivar la eficiencia de la empresa proveedora de los servicios de transmisión [1].

En este artículo se realizará una propuesta metodológica de tarificación de la transmisión para mercados competitivos de energía eléctrica. Bajo el seno del paradigma marginalista, se plantea considerar a la empresa de transmisión como un participante más activo dentro del mercado eléctrico, ofertando servicios a los usuarios y recibiendo por ellos tarifas variables en función de la eficiencia. La recuperación de los costos de transmisión y la repartición de ellos entre los usuarios se realiza a través de los precios spot derivados del proceso de optimización que resuelve el despacho óptimo cuando se consideran los costos de transmisión en la función objetivo.

Como contribución adicional, en este artículo se presentan dos métodos complementarios a la metodología de tarificación propuesta, métodos que permiten eliminar de la remuneración al transportista, que se deriva de la diferencia de precios nodales, las componentes debido a pérdidas de transmisión y restricciones activas de capacidad de transporte.

El artículo presenta la formulación del problema de despacho óptimo de generación cuando, además de la formulación clásica, se consideran los costos de transmisión en la función objetivo. Se presenta la estructura de los precios nodales derivados del problema de optimización considerando costos de transmisión. Se proponen funciones de costos de transmisión de tal forma que reflejen en la tarifa de transmisión las distintas componentes de los costos de transmisión (costos de fijos de inversión, costos variables y costos por servicios adicionales). Se formulan método de eliminación de las componentes debido a pérdidas y restricciones activas de transporte de la remuneración a la empresa de transporte. Finalmente se simulan, sobre sistemas de prueba, las distintas aplicaciones propuestas.

2. METODOLOGÍA DE TARIFACIÓN PROPUESTA

El problema del Despacho Óptimo de unidades generadoras en el corto plazo se formulará considerando los costos de generación y los costos de transmisión. De este modo el problema de optimización se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Minimizar: } Z = \sum_{i=1}^{N_g} C_i (Pg_i) + \sum_{l=1}^{N_t} C_l (F_l) \quad (34)$$

Sujeto a:

Restricción de Balance:

$$\Theta: \sum_{i=1}^{N_g} Pg_i = \sum_{i=1}^N Pd_i + \sum_{i=1}^{N_l} L_i \quad (35)$$

Restricción de capacidad de generación:

$$\Omega_i: Pg_{i,\min} \leq Pg_i \leq Pg_{i,\max} \quad (36)$$

Restricción de capacidad de transmisión:

$$\Phi_i: F_{i,\min} \leq F_i \leq F_{i,\max} \quad (37)$$

En inicio, la modelación se realizará utilizando un flujo de potencia DC sin pérdidas en la red. Si no se consideran las pérdidas en la red, la restricción de balance (6) resulta:

$$\Theta: \sum_{i=1}^{N_g} Pg_i = \sum_{i=1}^N Pd_i \quad (38)$$

Utilizando multiplicadores de Lagrange es posible transformar el problema de optimización con restricciones en un problema equivalente sin restricciones. La formulación del Lagrangiano considerando la función objetivo (5) y las restricciones (7), (8) y (9), queda de la siguiente forma:

$$\text{Minimizar: } L = Z + \lambda \Theta + \langle \xi, \Omega_i \rangle + \langle \mu, \Phi_i \rangle \quad (39)$$

2.1. Precios Nodales de Energía

La estructura de los precios nodales, que se derivan de las condiciones de optimalidad de primer orden de Kuhn-Tucker del problema equivalente expresado mediante la ecuación de Lagrange, es la siguiente:

$$\rho_i = \lambda - \sum_{i=1}^{N_l} \frac{\partial C_i(F_i)}{\partial F_i} * A_{ii} \quad (40)$$

Donde:

ρ_i = Es el precio nodal de la barra i .

$A_{ii} = \frac{\partial F_i}{\partial Pg_i}$ = Es el factor de distribución de la línea

ℓ con respecto al nodo i . Indica el valor marginal del flujo de potencia de la línea ℓ debido a una variación en la inyección de potencia en la barra i .

$\lambda = \frac{\partial C_m(Pg_m)}{\partial Pg_m}$ = Es el costo marginal del sistema,

siendo m el generador marginal, para el cual $\xi_m = 0$.

La expresión (15) define el precio nodal de la barra i , el cual tiene la siguiente estructura:

- El costo marginal de generación (λ).
- El segundo término es la asignación de los costos de todas las instalaciones de transmisión al nodo i . Esta asignación se realiza en función de los factores de distribución A_{ii} .

Respecto del costo marginal de generación del sistema, (λ), el nodo i verá afectado su precio en proporción al costo marginal de transmisión del recurso

ℓ , $\left(\frac{\partial C_i}{\partial F_i} \right)$, repartido a cada nodo en función del uso

marginal que hace de dicho recurso (factor de distribución).

En los nodos de generación que se ocasione un aumento marginal del flujo F_i ante una inyección de potencia positiva, se verá una reducción del precio, mientras que en los nodos de demanda que se ocasione un aumento marginal de flujo F_i ante una inyección de potencia, se verá un aumento del precio correspondiente al cargo por transporte.

3. TARIFACIÓN DE LA TRANSMISIÓN

La remuneración al transportista se propone como la diferencia entre los cobros a las demandas y los pagos a las generaciones realizados a precios spot horarios. Cuando se modelan los costos de transmisión en la FOCP, los precios nodales permitirán la recuperación de los costos de transmisión a través de la diferencia de cobros y pagos.

Se ha adoptado una metodología de tarifación de la energía con costos marginales de corto plazo. Cuando estos costos se derivan de un modelo de optimización que considera pérdidas en la red y restricciones de capacidad de transporte, la remuneración variable al transmisor que se origina de la diferencia de cobros y pagos es insuficiente, lográndose recuperar entre el 5% y 20% de los costos totales. Lo anterior se propone superar a través de la inclusión de funciones de costos adecuadas en la FOCP.

3.1. Funciones de Costo de Transmisión

3.1.1. Funciones de Costos Lineales - $f(x) = kx$

Quando se consideran funciones de costos de transmisión lineales (del tipo $C_i(F_i) = k_i F_i$ [\$/MW - km]), a través de la diferencia de cobros y pagos a precios spot, se logra recuperar exactamente los costos de transmisión que fueron modelados en la FOCP. Esto es:

$$RT = \sum_{i=1}^N Pd_i \rho_i - \sum_{j=1}^{Ng} Pg_j \rho_j = \sum_{l=1}^{N_l} C_l(F_l) \quad (41)$$

La expresión es el objetivo deseable desde el punto de vista del balance de liquidación de transacciones, de la recuperación de los costos totales de transmisión y de la correcta asignación del costo para cada usuario del transporte.

Cuando se consideran funciones de costo de transmisión distintas, la igualdad de (41) no se cumple. En la siguiente sección se mostrará la forma de lograr el objetivo de recuperar los costos deseados cuando se deseen representar funciones de costo de transmisión a través de expresiones que no tengan la forma $f(x) = kx$.

3.1.2. Funciones de Costos de Transmisión Generalizadas

Uno de los propósitos de la metodología es recuperar los costos fijos de transmisión, los cuales son independientes del flujo de potencia. Para ello se debe encontrar la manera de incorporar estos costos en la FOCP de tal forma que se reflejen en los precios nodales. Es decir que no se desvanezcan al momento de realizar las derivadas con respecto a las variables de decisión (inyecciones nodales y flujos de potencia) [1].

El objetivo del siguiente análisis es modelar funciones auxiliares $C'_i(F_i)$, de tal forma que, al incluirlas en la FOCP, los costos de transmisión, que se recuperan a través de la diferencia de cobros y pagos, sean iguales a los costos evaluados a través de las funciones que definen exactamente los costos de cada instalación de transmisión $C_i(F_i)$. Es decir, la remuneración obtenida a través de la diferencia de cobros y pagos a precios spot continúe siendo igual a los costos de transmisión definidos por las funciones $C_i(F_i)$:

$$RT = \sum_{i=1}^N Pd_i \rho_i - \sum_{j=1}^{Ng} Pg_j \rho_j = \sum_{l=1}^{N_l} C_l(F_l) \quad (42)$$

Las funciones de costos auxiliares $C'_i(F_i)$, que permiten recuperar a través de la diferencia de precios spot los costos de transmisión definidos por las funciones de costos originales $C_i(F_i)$, se encuentran a través de la siguiente expresión:

$$C'_k(F_k) = \int \frac{C_k(F_k)}{F_k} dF_k \quad (43)$$

Con la ayuda de estas funciones auxiliares se logra que (17) se cumpla para cualquier tipo de funciones

$C_k(F_k)$ y no solamente para funciones lineales. Ahora se podrán definir los costos de transmisión a través de cualquier tipo de funciones.

3.2. Modelación de Costos Fijos

Si los costos que deseamos recuperar por cada instalación son k unidades monetarias:

$$C_k(F_k) = k \quad (44)$$

Según (23), las funciones auxiliares $C'_k(F_k)$ toman la forma:

$$C'_k(F_k) = k \ln(F_k) \quad (45)$$

3.3. Inclusión del Cargo por Incremento de la Confiabilidad

El objetivo de esta sección es mostrar una alternativa de como considerar la confiabilidad en las tarifas de transporte. Pueden existir muchas otras alternativas a través de varios otros índices. De todas formas, cualquiera que sea la metodología aplicada para determinar la confiabilidad del sistema de transmisión; ésta puede ser adherida a la metodología de tarificación propuesta en este trabajo.

Una definición bastante clara de *Beneficio por Confiabilidad* que brinda una instalación de transmisión al sistema es la diferencia entre el costo del valor esperado de energía no suministrada en el sistema eléctrico con y sin la instalación de transmisión [1].

$$BC_k = VENS(EENS_{sin\ línea\ k}) - VENS(EENS_{con\ línea\ k}) \quad (46)$$

Donde:

- BC_k = Es el beneficio por confiabilidad de la línea k .
- $VENS$ = Es el costo de la energía no suministrada, expresado a través de una constante o una función de $EENS$.

El estudio de confiabilidad podrá ser realizado para todo un período tarifario (anual o estacional) y sobre la base de:

- Suponer confiabilidad del parque generador idéntica para los casos en que se considera el sistema con y sin la línea del tal forma de identificar el incremento de la confiabilidad en el sistema debido únicamente a la presencia de las instalaciones de transmisión.
- Considerar escenarios significativos de demanda. Por ejemplo se pueden considerar los escenarios de demanda base, media y pico. Para estos

escenarios se obtienen los flujos de potencia y el beneficio por confiabilidad que brinda cada línea. De esta forma, para cada escenario, se obtiene la relación flujo por la línea vs. beneficio por confiabilidad.

- A partir de estos datos se obtiene las relaciones flujo-beneficio por confiabilidad las cuales serán modeladas en la FOCP como componentes adicionales de los cargos de transporte.

La repartición del beneficio por confiabilidad que brinda cada línea al sistema se la hace, al igual que los otros cargos de transmisión, en forma marginal y en función de la sensibilidad de los flujos respecto de las inyecciones (medida del uso de la red en función de factores de distribución).

4. ELIMINACIÓN DEL CARGO POR PÉRDIDAS DE TRANSMISIÓN

El objetivo de esta sección es mostrar que la remuneración variable al transmisor, que se origina de la diferencia de precios spot cuando éstos consideran las pérdidas marginales de transmisión, es debido a la naturaleza cuadrática de las pérdidas debido al efecto Joule y no obedece a ningún motivo económico. A partir de esa concepción se propone un método para eliminar la componente por pérdidas de los ingresos al transmisor pero sin dejar completamente de lado las señales por pérdidas en la red que brindan los precios spot.

Cuando el modelo considera las pérdidas en la red y los costos de transmisión, la estructura de los precios nodales es como sigue:

$$\rho_i = \lambda F n_i - \sum_{l=1}^{N_l} \frac{\partial C_l(F_l)}{\partial F_l} A_{li} \quad (47)$$

Donde:

$$\left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P g_i} \right) = F n_i =$$

Es el factor de nodo de la barra i , e indica el cambio marginal de las pérdidas de transmisión debido a una variación en la inyección de potencia en esa barra.

Cuando se consideran las pérdidas de transmisión aparecen en los precios nodales spot los factores de nodo que hacen que la igualdad de (41) no se cumpla. Cuando los precios tienen la estructura de (47) sucede:

$$\sum_{i=1}^N P d_i \rho_i - \sum_{j=1}^{N_g} P g_j \rho_j = \sum_{i=1}^{N_l} C_l(F_l) + \Delta_{perd.} \quad (48)$$

Siendo:

Δ_{perd} El ingreso para el transmisor que se origina debido la componente de pérdidas marginales de transmisión en los precios nodales (Efecto Joule).

En sistemas eléctricos de varios países que han adoptado esquemas de tarifación marginal, la diferencia de cobros a las demandas y pagos a la generación, a precios spot nodales que incluyen pérdidas marginales de la red, se considera como un ingreso para el transmisor. Como se mencionó anteriormente este cargo, conocido como *remuneración variable al transmisor*, es insuficiente para cubrir los costos totales. La remuneración variable al transmisor, cuando no se modelan los costos de transmisión y en ausencia de congestión en la red, se debe a las pérdidas marginales de transporte. Esta componente de los precios nodales trata de determinar la participación marginal en las pérdidas en la red de cada inyección nodal (a través de los factores de nodo).

Esta diferencia entre cobros y pagos (*“merchandise surplus”*) se justifica como un ingreso para el transmisor debido a que los costos de transporte no se modelan en la FOCP de tal forma que los precios no reflejan estos costos.

Por otro lado se puede demostrar que esta diferencia se produce únicamente debido a la naturaleza cuadrática de las pérdidas. Si esta relación, hipotéticamente fuese lineal, la diferencia resultaría nula. Esto indica que, si las pérdidas de transmisión fuesen lineales con el flujo, la reducción del precio en el nodo generador compensa exactamente el aumento de generación necesaria para cubrir las pérdidas en la línea, resultando el balance del mercado sin excedentes para el transmisor.

Ante la aparición de esta componente derivada de la naturaleza cuadrática de las pérdidas, existen tres alternativas a ser consideradas en el esquema de tarifación:

- Considerar la componente de pérdidas marginales en los precios nodales como un ingreso para el transmisor. Esto se justifica cuando los costos de transmisión no son modelados y se trata de recuperar algo a través de los precios nodales, completando los costos a cubrir mediante cargos complementarios.
- Eliminar totalmente la componente de pérdidas marginales de la red. Con esto se logra eliminar la diferencia entre cobros y pagos pero se dejan de lado las señales de pérdidas en la red.
- Modificar los precios nodales (o factores de nodo) para que, aún considerando las señales de pérdidas en la red, se logre eliminar la diferencia entre cobros y pagos.

La última alternativa es la que se propone en este artículo ya que la inclusión de los costos de transmisión en la función objetivo permite su recuperación mediante los precios nodales y, al mismo tiempo, se conserva la señal de pérdidas de transmisión en los precios.

Varios autores han propuesto métodos para la eliminación de la diferencia debido a las pérdidas, por ejemplo Bialeck J.W. en [2]. A continuación se demostrará que para la tarificación de la red (respetando el resultado del despacho considerando pérdidas), se logra eliminar esta diferencia considerando las señales de pérdidas marginales de transporte cuando se definen los factores de nodo como [1]:

$$Fn_i = \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\partial P_L}{\partial P_i}\right) \quad (49)$$

Para la demostración se supondrá un sistema de N nodos. A partir de (47) se pueden formular los precios nodales, cuando se consideran las pérdidas en la red y no los costos de transmisión, de la siguiente forma:

$$\rho_i = \lambda Fn_i = \lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_i}\right) \quad (50)$$

La propuesta del método es atenuar la señal de pérdidas marginales de transporte modificando los precios de la siguiente forma:

$$\rho_i' = \lambda \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\partial P_L}{\partial P_i}\right) \quad (51)$$

El siguiente paso es determinar la remuneración al transmisor, que se derivada de la diferencia entre cobros y pagos, utilizando para ello los precios nodales modificados según (51).

$$RVT = \sum_{i=1}^N Pd_i \rho_i' - \sum_{j=1}^{Ng} Pg_j \rho_j' \quad (52)$$

Se reemplaza en (52) la expresión de los precios nodales dada en (51):

$$RVT = \sum_{i=1}^N Pd_i \lambda \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\partial P_L}{\partial P_i}\right) - \sum_{j=1}^{Ng} Pg_j \lambda \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\partial P_L}{\partial P_j}\right) \quad (53)$$

Reordenando, el término de la derecha puede escribirse como:

$$RVT = \lambda \left[\sum_{i=1}^N Pd_i - \sum_{j=1}^{Ng} Pg_j - \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^N Pd_i \frac{\partial P_L}{\partial P_i} - \sum_{j=1}^{Ng} Pg_j \frac{\partial P_L}{\partial P_j} \right) \right] \quad (54)$$

De la definición de pérdidas de transporte y de las expresiones de un flujo DC, respectivamente, se conoce que:

$$\sum_{i=1}^N Pd_i - \sum_{j=1}^{Ng} Pg_j = -P_L \quad (55)$$

$$\frac{\partial P_L}{\partial P_i} = 2 \sum_{l=1}^{N_l} R_l F_l A_{li} \quad (56)$$

Reemplazando (55) y (56) en (54) se tiene:

$$RVT = \lambda \left[-P_L - \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^N Pd_i \sum_{l=1}^{N_l} 2 R_l F_l A_{li} - \sum_{j=1}^{Ng} Pg_j \sum_{l=1}^{N_l} 2 R_l F_l A_{lj} \right) \right] \quad (57)$$

Agrupando de otra manera los sumatorios se tiene:

$$RVT = \lambda \left[-P_L - \frac{1}{2} \left(\sum_{l=1}^{N_l} 2 R_l F_l \sum_{j=1}^{Ng} Pd_j A_{lj} - \sum_{l=1}^{N_l} 2 R_l F_l \sum_{j=1}^{Ng} Pg_j A_{lj} \right) \right] \quad (58)$$

Operando (58), se obtiene factor común:

$$RVT = \lambda \left[-P_L - \frac{1}{2} \left(\sum_{l=1}^{N_l} 2 R_l F_l \left(\sum_{j=1}^{Ng} Pd_j A_{lj} - \sum_{j=1}^{Ng} Pg_j A_{lj} \right) \right) \right] \quad (59)$$

De acuerdo con las expresiones de un flujo DC se conoce que:

$$\sum_{j=1}^{Ng} Pg_j A_{lj} - \sum_{i=1}^N Pd_i A_{li} = F_l$$

Reemplazando esta última definición en (59) se obtiene:

$$RVT = \lambda \left[-P_L + \frac{1}{2} \left(\sum_{l=1}^{N_l} 2 R_l F_l F_l \right) \right] \quad (60)$$

$$RVT = \lambda \left[-P_L + \sum_{l=1}^{N_l} R_l F_l^2 \right] \quad (61)$$

Finalmente, se conoce que $P_L = \sum_{i=1}^{N_l} L_i$ y en p.u.

$L_i = R_i F_i^2$, por lo tanto:

$$RVT = 0 \quad (62)$$

De esa manera se ha demostrado que pese a tomar en cuenta las pérdidas marginales de transporte en los precios nodales (a través de factores de nodo definidos

como $F_{n_i} = \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\partial P_i}{\partial P_i}\right)$, se logra eliminar la

diferencia entre cobros y pagos. Así la recuperación de los costos variables de transporte debe realizarse a través de las componentes de los precios de transmisión reflejados en los precios nodales como consecuencia de los costos de transmisión incluidos en la FOCP.

5. ELIMINACIÓN DEL CARGO POR RESTRICCIONES DE CAPACIDAD EN LA RED

Al igual que cuando se consideran las pérdidas de transmisión la igualdad de la ecuación (25) no se cumple debido a la activación de restricciones de capacidad de transporte. La diferencia de cobros y pagos es mayor que los ingresos necesarios para el transmisor. Es justificado este ingreso para el transportista con el argumento de que es la señal clara de falta de capacidad en la red. En la práctica, esa diferencia se convierte en una señal económica inadecuada para el transportista.

En varios esquemas tarifarios estos ingresos van a la empresa de transporte o a un fondo con el objetivo de utilizar ese dinero para levantar las restricciones de capacidad de transporte. Ya que en la metodología de tarificación propuesta se modelarán los costos fijos y se incentivará directamente al transportista para que ponga a disposición del mercado mayor capacidad de transmisión, se bosqueja a continuación la forma de eliminar esta componente de los precios nodales.

Para ello, se plantea un método que incluya la expresión de esta diferencia en la FOCP. Con ello, se obtiene idéntico despacho que el que se encontró con la FOCP original y nada más se modifican los precios nodales para eliminar esta diferencia.

De manera análoga a (48), se tiene que:

$$\sum_{i=1}^N Pd_i \rho_i - \sum_{j=1}^{Ng} Pg_j \rho_j = \sum_{i=1}^{N_i} C_i(F_i) + A_{perd} + A_{rest} \quad (63)$$

Considerando las igualdades de las ecuaciones (17) y (48), se puede determinar que la expresión de los ingresos, causados por las restricciones de transporte es:

$$A_{rest} = \sum_{j=1}^{N_g} Pg_j \sum_{l=1}^{N_l} \mu_l A_{jl} - \sum_{i=1}^N Pd_i \sum_{l=1}^{N_l} \mu_l A_{il} \quad (64)$$

La ecuación (64) se determina como un subproducto del problema de optimización matemática en el punto de solución. Está en función de las potencias de generación y de los multiplicadores de Lagrange de las restricciones de capacidad de transporte, que son resultados del problema de optimización.

Para lograr que la diferencia de cobros y pagos sea igual a los costos modelados, inclusive en presencia de congestión en la red, se proponen modelar funciones $\tilde{C}_i(F_i)$ de tal forma que no modifiquen el despacho original y que eliminen el ingreso debido a las restricciones de transporte. Es decir que se cumpla que:

$$\sum_{j=1}^{N_g} Pg_j \sum_{l=1}^{N_l} \frac{\partial \tilde{C}_i(F_i)}{\partial F_i} A_{jl} - \sum_{i=1}^N Pd_i \sum_{l=1}^{N_l} \frac{\partial \tilde{C}_i(F_i)}{\partial F_i} A_{il} \quad (65)$$

$$+ \sum_{j=1}^{N_g} Pg_j \sum_{l=1}^{N_l} \mu_l A_{jl} - \sum_{i=1}^N Pd_i \sum_{l=1}^{N_l} \mu_l A_{il} = \sum_{i=1}^{N_i} C_i(F_i)$$

Se determina que los primeros dos términos de (65) son:

$$\sum_{j=1}^{N_g} Pg_j \sum_{l=1}^{N_l} \frac{\partial \tilde{C}_i(F_i)}{\partial F_i} A_{jl} - \sum_{i=1}^N Pd_i \sum_{l=1}^{N_l} \frac{\partial \tilde{C}_i(F_i)}{\partial F_i} A_{il} = \sum_{i=1}^{N_i} \tilde{C}_i(F_i) \quad (66)$$

Reemplazando (66) en (65) se tiene:

$$\sum_{i=1}^{N_i} \tilde{C}_i(F_i) + \sum_{j=1}^{N_g} Pg_j \sum_{l=1}^{N_l} \mu_l A_{jl} - \sum_{i=1}^N Pd_i \sum_{l=1}^{N_l} \mu_l A_{il} = \sum_{i=1}^{N_i} C_i(F_i) \quad (67)$$

Por lo tanto:

$$\sum_{i=1}^{N_i} \tilde{C}_i(F_i) = \sum_{i=1}^{N_i} C_i(F_i) - \left(\sum_{j=1}^{N_g} Pg_j \sum_{l=1}^{N_l} \mu_l A_{jl} - \sum_{i=1}^N Pd_i \sum_{l=1}^{N_l} \mu_l A_{il} \right) \quad (68)$$

Agrupando términos bajo un mismo índice:

$$\sum_{i=1}^{N_i} \tilde{C}_i(F_i) = \sum_{i=1}^{N_i} \left(C_i(F_i) - \sum_{j=1}^{N_g} Pg_j \mu_l A_{jl} + \sum_{i=1}^N Pd_i \mu_l A_{il} \right) \quad (69)$$

La expresión (69) indica que, las funciones auxiliares $C_i(F_i)$, a modelar en la FOCP tienen en su estructura:

- Las componentes de costos $C_i(F_i)$ que son las que se requieren recuperar exactamente.
- Otra componente que es igual a los cargos de congestión que ocasiona esa línea y que está en función de las variables Pg_j , y de valores que ahora son conocidos del punto de solución del

despacho y de la configuración de la red: μ_l y A_{ij} respectivamente.

Visto de otra manera, (68) indica que para eliminar esta diferencia se debe modelar en la FOCP un término adicional igual a:

$$-\Delta_{rest} = \sum_{i=1}^N Pd_i \sum_{l=1}^{N_l} \mu_l A_{li} - \sum_{j=1}^{N_g} Pg_j \sum_{l=1}^{N_l} \mu_l A_{lj} \quad (70)$$

Para la aplicación de este método se realiza el siguiente procedimiento [1]:

- En primer lugar se realiza el despacho óptimo sin considerar (70) en la FOCP. Como resultado de este proceso de optimización se obtienen, entre otros resultados, los multiplicadores de Lagrange de las restricciones de transporte activas.
- Se modifican los términos de la FOCP con la inclusión de las expresiones en función de los multiplicadores de Lagrange y se realiza un nuevo proceso de optimización.
- Como resultado de este nuevo proceso de optimización se consigue que el despacho, y por lo tanto los flujos, no varíen, sino solamente los precios nodales, eliminando de ellos la componente de las restricciones activas de transmisión.

6. EJEMPLOS

6.1. Ejemplo 1

En este ejemplo se muestra la modelación de costos fijos (independientes del flujo) y variables (dependientes del flujo) en la FOCP. Esta aplicación fue realizada para el sistema de tres nodos de la Figura 1.

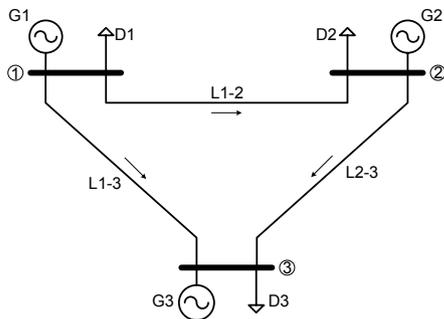


FIGURA 1: Sistema de Prueba de Tres Nodos

La modelación de ambas componentes se realizó a través de las siguientes funciones de costos:

$$C_{L1-2}(F_{1-2}) = 19.38 \ln(F_{1-2}) + 0.1490 F_{1-2} \quad \text{Para la línea 1-2.} \quad (71)$$

$$C_{L1-3}(F_{1-3}) = 21.80 \ln(F_{1-3}) + 0.1895 F_{1-3} \quad \text{Para la línea 1-3.} \quad (72)$$

$$C_{L2-3}(F_{2-3}) = 15.14 \ln(F_{2-3}) + 0.0721 F_{2-3} \quad \text{Para la línea 2-3.} \quad (73)$$

Los resultados de la simulación considerando costos fijos y variables de transmisión se presentan en la Tabla 1.

En este ejemplo se puede observar que los costos de transmisión se reflejan en los precios nodales en función de los factores de distribución y ocasionan una remuneración al transmisor que es exactamente igual a los costos totales modelados en la FOCP para esa hora (US\$ 56,31 + US\$ 61,89).

De esta forma se garantiza la recuperación de la totalidad de los costos y una correcta asignación de ellos entre los usuarios de la red. Con respecto al despacho clásico (sin considerar costos de transmisión), el de este ejemplo varía debido a la componente variable de los costos de transmisión arrojando un nuevo despacho que ocasiona los menores costos totales, ya que el despacho resulta función solamente de los costos variables.

TABLA 1: Despacho Óptimo Considerando Costos de Transmisión Fijos y Variables

Nodo	Generación	Demanda	Pot. Neta	Precio Nodal	Ángulo
	MW	MW	MW	\$/MWh	pu
N1	483.74	200.00	283.74	9.24387	-1.76102
N2	443.15	400.00	43.15	9.49634	-2.07788
N3	173.11	500.00	-326.89	9.63879	-2.17867
TOTAL	1100.00	1100.00	0.00		

Línea	Capacidad	Flujo	Constante k	Costos Fijos	Costos Variab.
	MW	MW	\$/MW	\$	\$
N1.N2	200	158.43	0.1490	19.38	23.61
N1.N3	150	125.31	0.1895	21.80	23.75
N2.N3	250	201.58	0.0721	15.14	14.53
TOTAL				56.31	61.89

RVT
\$
118.20

6.2. Ejemplo 2

El objetivo de este ejemplo es mostrar la aplicación del método de eliminación de la diferencia entre cobros y pagos ("merchandise surplus"), de la remuneración al transmisor. Para ello se utilizarán los resultados de un despacho óptimo con pérdidas en la red pero sin considerar costos de transmisión. Luego se determinan las pérdidas marginales de transmisión

$$\left(\frac{\partial P_l}{\partial P_i} \right) \text{ en cada nodo.}$$

Con las pérdidas marginales de transmisión se pueden determinar los factores de nodo del problema y los factores de nodo modificados, como sigue:

$$Fn_i = \left(1 - \frac{\partial P_i}{\partial P_i}\right) \quad (74)$$

$$Fn'_i = \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\partial P_i}{\partial P_i}\right) \quad (75)$$

A través de la modificación de los factores de nodo se encuentran nuevos precios nodales. Estos precios siguen teniendo la diferenciación espacial por pérdidas pero más atenuada. Lo importante es que se logra eliminar el “surplus”.

Los resultados de este procedimiento se presentan en la Tabla 2.

Se comprueba como, manteniendo una señal de pérdidas marginales de transmisión en los precios nodales, se logra eliminar esta componente de la remuneración al transmisor. Lo precios modificados no dejan de lado la señal de pérdidas marginales de transmisión, es decir siguen teniendo una diferenciación espacial. Únicamente se ha atenuado la señal para que se logre anular la diferencia entre cobros y pagos.

TABLA 2: Eliminación de la Componente de Pérdidas de la Remuneración al Transmisor

Nodo	Generación	Demanda	Pot. Neta	Precio Nodal	Fn	Fn'	Precio Nodal'
	MW	MW	MW	\$/MWh	pu	pu	pu
N1	444.63	200.00	244.63	9.30901	0.91611	0.95803	9.73502
N2	439.75	400.00	39.75	9.55621	0.94043	0.97011	9.85780
N3	227.33	500.00	-272.67	10.16148	1.00000	1.00000	10.16148
TOTAL	1111.71	1100.00	11.71				

Línea	Capacidad	Flujo	Constante k	Costos Fijos	Costos Variab.
	MW	MW	\$/MWh	\$	\$
N1.N2	200	135.09	0.0000	0.00	0.00
N1.N3	150	106.58	0.0000	0.00	0.00
N2.N3	250	170.12	0.0000	0.00	0.00
TOTAL				0.00	0.00

RVT
\$
113.61

RVT'
\$
0.00

Este procedimiento podría ser válido dentro del marco de la metodología de tarificación, anteriormente propuesta, ya que los costos variables de transmisión serán modelados a través de las funciones de costo y éstos se recuperan a través de los precios nodales.

6.3. Ejemplo 3

A través de este ejemplo se visualiza el efecto de la congestión en la línea 1-2 en la remuneración al transmisor. Se tomará como caso base un despacho óptimo considerando costos variables de transmisión y capacidad de la línea 1-2 limitada a 125 MW. Resultados que se presentan en la Tabla 3.

TABLA 3: Despacho Óptimo Considerando Restricción Activa de la Línea 1-2

Nodo	Generación	Demanda	Pot. Neta	Precio Nodal	Ángulo
	MW	MW	MW	\$/MWh	pu
N1	431.31	200.00	231.31	9.26740	0.78853
N2	483.63	400.00	83.63	9.72649	0.53853
N3	185.06	500.00	-314.94	9.75401	0.43421
TOTAL	1100.00	1100.00	0.00		

Línea	Capacidad	Flujo	Constante k	Costos Fijos	Costos Variab.
	MW	MW	\$/MWh	\$	\$
N1.N2	125	125.00	0.1490	0.00	18.63
N1.N3	150	106.31	0.1895	0.00	20.15
N2.N3	250	208.63	0.0721	0.00	15.04
TOTAL				0.00	53.82

RVT
\$
114.86

Los costos variables necesarios en la hora simulada son US\$ 53,82 pero debido a la activación de la restricción de capacidad de la línea 1-2 los precios varían ocasionando una diferencia entre cobros y pagos de US\$ 114,86.

El ingreso que se ocasiona por congestión en la red es justificado como una señal por la falta de capacidad, que brinda a la empresa de transmisión fondos adicionales que le permitan realizar las inversiones para levantar la restricción de la red. La falta de capacidad en la red es una fuente importante de volatilidad en los precios marginales de corto plazo, debido al ingreso de energía más cara que se reflejan como valores sombra en los precios nodales.

Luego se aplica el método de eliminación del cargo por congestión a través de la modelación en la FOCP del término:

$$-A_{rest} = \sum_{i=1}^N Pd_i \sum_{l=1}^{N_l} \mu_l A_{li} - \sum_{j=1}^{N_g} Pg_j \sum_{l=1}^{N_l} \mu_l A_{lj} \quad (76)$$

A través del método se logra eliminar la componente por congestión en la remuneración al transmisor.

Ahora se logra recuperar a través de la diferencia de cobros y pagos exactamente los costos necesarios (US\$ 53,82). El despacho y los flujos por las líneas no varían y solamente se modifican los precios nodales al suprimirse la señal de congestión. Los resultados de la aplicación del método de eliminación del cargo por congestión se presentan en la Tabla 4.



TABLA 4: Eliminación de la Componente de Congestión de la Remuneración al Transmisor

Nodo	Generación	Demanda	Pot. Neta	Precio Nodal	Ángulo
	MW	MW	MW	\$/MWh	pu
N1	431.31	200.00	231.31	9.54642	-2.02159
N2	483.63	400.00	83.63	9.68463	-2.27159
N3	185.06	500.00	-314.94	9.75401	-2.3759
TOTAL	1100.00	1100.00	0.00		

Línea	Capacidad	Flujo	Constante k	Costos Fijos	Costos Variab.
	MW	MW	\$/MW	\$	\$
N1.N2	125	125.00	0.1490	0.00	18.63
N1.N3	150	106.31	0.1895	0.00	20.15
N2.N3	250	208.63	0.0721	0.00	15.04
TOTAL				0.00	53.82

RVT
\$
53.82

7. CONCLUSIONES

Como un aporte complementario a la metodología de tarifación propuesta, fue presentado un método de eliminación de la remuneración variable al transmisor de la componente que se produce debido a las pérdidas marginales de transmisión. El método no deja de lado la diferenciación espacial de los precios debido a las pérdidas marginales de la red sino que la atenúa. Se justifica este método en el marco de la metodología de tarifación propuesta debido a que los costos variables de transmisión fueron modelados en la FOCP y recuperados directamente de la diferencia de precios nodales evitando recuperar cargos económicamente injustificados debido a las pérdidas marginales en la red, los cuales responden a una ley física sin correlato con los costos de transmisión.

Como se pudo demostrar, la remuneración que se produce por la diferencia de precios nodales cuando se consideran pérdidas en la red, no obedece a ningún modelo económico sino que se derivan de la naturaleza cuadrática de las pérdidas debido al efecto Joule. Se

propone superar este aspecto mediante la inclusión de los costos variables de transmisión en la FOCP de tal forma que se reflejen en los precios nodales y, por lo tanto, en la remuneración al transmisor. En este sentido se justifica el método de eliminación del cargo correspondiente a las pérdidas de la red antes mencionado.

Como aporte complementario a la metodología de tarifación propuesta, se modeló un método de eliminación de la componente de congestión en la red de los precios nodales. Estas componentes eran justificadas como las que dan las señales al transmisor y al sistema por falta de capacidad y otorgan ingresos adicionales para levantar esas restricciones de transporte. Bajo la metodología planteada las señales por falta de capacidad se las brinda directamente al transportista a través de restringirle sus ingresos por no tener mayor capacidad de transmisión.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] SALAZAR, G.; Tarifación Óptima de Servicios de Transmisión en un Mercado Competitivo de Energía Eléctrica, Tesis Doctoral, IEE-UNSJ, 2005.
- [2] YONG, Fu; YAN, Zhang; Improvement of Open Transmission Access Reliability Based on a Reasonable Pricing Signal, International Conference on Power System Technology, PowerCon 2002, Proceedings, Vol. 4, 13-17 Oct 2002, pp 2423 – 2425.
- [3] BIALEK, J.W.; Elimination of Merchandise Surplus due to Spot Pricing of Electricity, IEE Proceedings in Generation, Transmission and Distribution, Vol. 144, No. 5, Sep 1997, pp. 399 – 405.