

# COMBINACIÓN DE DESPACHOS EN BOLSA Y CONTRATOS BILATERALES

## RESUMEN

Este artículo es una continuación a un estudio que se ha venido haciendo sobre el flujo de potencia óptimo FPO y se basa en la interpretación del tema del despacho de potencia bajo una combinación bolsa/negocios bilaterales. Lo que este documento propone es un modelo de flujo de potencia óptimo de un paso que despacha la combinación en bolsa con los contratos bilaterales negociados privadamente mientras se minimizan costos y se distribuyen entre ambos pérdidas y congestión.

**PALABRAS CLAVE:** Contratos Bilaterales, FPO, Pérdidas y Congestión, Despacho en Bolsa.

## ABSTRACT

*This paper deals with the dispatch the power networks under mixed pool/bilateral trading. What this paper proposes is a one-step optimal power flow model that dispatches the pool in combination with the privately negotiated bilateral contracts while minimizing cost and accounting for both losses and congestion.*

**KEYWORDS:** *Bilateral contracts, OPF, losses and congestion, pool dispatch.*

**MAURICIO GRANADA E.**

Estudiante Maestría en Ingeniería Eléctrica U.T.P.

e-mail: [magra@utp.edu.co](mailto:magra@utp.edu.co)

**Grupo de Investigación en Planeamiento de Sistemas Eléctricos Universidad Tecnológica de Pereira**

## 1. INTRODUCCIÓN

Este documento pretende dar continuidad a un trabajo investigativo cuya primera entrega hace referencia al flujo de potencia óptimo usando el método del gradiente [6]. Después se presentó una metodología de descomposición del precio nodal de energía eléctrica en un sistema de potencia [7] y finalmente, con estas herramientas, se pretende interpretar y poner a disposición de la comunidad académica y profesional el problema del despacho económico combinando bolsa y contratos bilaterales expuesto en [1], [2] y [3] desde su forma más básica (contratos bilaterales firmados) hasta su forma más compleja (contratos firmados y no firmados acortados). Lo anterior abre un campo de investigación en el tema tarifario aplicando nuevas técnicas para dichos estudios.

Este artículo tiene como meta proporcionar información para ayudar al generador y los centros de carga a escoger apropiadamente cantidades de potencia de bolsa frente a potencia proveniente de negocios bilaterales, mientras se considera riesgo, desempeño económico y restricciones físicas.

En este artículo los contratos bilaterales son de diferentes tipos; firmados sin posibilidad de acortamiento y firmados y no firmados con posibilidad de acortamiento.

## 2. CONTRATOS FIRMADOS SIN POSIBILIDAD DE ACORTAMIENTO (CONTRATOS INVOLABLES)

Se pretende brindar más alternativas para suplir las necesidades a cargas individuales, permitiendo que estas compren a un mercado centralizado o directamente a generadores o mercados con los que ha establecido contratos bilaterales. Estos contratos son generalmente de larga duración y tienden a ofrecer estabilidad financiera para los generadores y bajos precios para las cargas cuando se le compara con los precios de mercado de bolsa. Este numeral trata el caso en que el contrato bilateral es inviolable, es decir, se debe asegurar el cumplimiento de transferencia de potencia del generador a la carga estipulado en el contrato.

### 2.1. Componentes de carga y generación de la combinación bolsa/ bilateral.

Se tiene el vector de Potencia Real demandada en un sistema de n barras y denotado por:

$$P_d = P_{dj} \quad \text{Con } j=1\dots n$$

Este vector es conformado por dos componentes; la “demanda bilateral”  $P_d^b = P_{dj}^b$  con  $j=1\dots n$ , la cual suple

el contrato bilateral físico privado. Y la “demanda de bolsa”  $P_d^p = P_{dj}^p$  Cuyo suministro es controlado centralizadamente por la bolsa. Se tiene:

$$P_d = P_d^p + P_d^b \quad (1)$$

Adicionalmente, el componente de demanda o carga bilateral se puede descomponer en la suma de contratos bilaterales negociados privadamente con los generadores alimentadores, esto es:

$$P_{dj}^b = \sum_{i=1}^n GD_{ij} \quad (2)$$

Donde  $GD = GD_{ij}$  con  $i = 1, \dots, n$  y  $j = 1, \dots, n$ . Esta matriz representa los contratos bilaterales vistos en la carga (buses  $j$ ) desde los generadores (buses  $i$ ). Por efectos de simplicidad, se asume que cada bus tiene solamente una carga y/o un generador. Definiendo ahora el vector  $e = \{1, 1, \dots, 1\}^T$  de dimensión  $n$  y usando (2); el vector de demanda bilateral  $P_d^b$  puede ser expresado mas compactamente como

$$P_d^b = GD^T \cdot e \quad (3)$$

La generación bilateral programada puede ser descrita, análogamente, como:

$$P_{gi}^b = \sum_{j=1}^n GD_{ij} \quad (4)$$

En forma vectorial sería:

$$P_g^b = GD \cdot e \quad (5)$$

El vector de generación total  $P_g$  es definido como la suma de los contratos bilaterales programados  $P_g^b$  y el componente de generación en bolsa  $P_g^p$ ; es decir

$$P_g = P_g^b + P_g^p \quad (6)$$

Nótese que la componente  $P_g^p$  suple la demanda de bolsa  $P_d^p$  así como también cualquier perdida de transmisión y redespacho de congestión debido a los efectos combinados de la demanda bilateral y en bolsa.

## 2.2. Formulación combinada bolsa / despachos bilaterales: contratos bilaterales firmados.

Se tiene la curva de costo de generación ofrecida en bolsa del generador  $i$  denotada por  $C_i(P_{gi})$  y el costo ofrecido de generación en bolsa total

$$C(P_g) = \sum_{i=1}^n C_i(P_{gi})$$

Si los contratos bilaterales son firmados, la estrategia combinada bolsa / generación bilateral puede ser expresada por el siguiente problema de flujo de potencia óptimo:

$$\begin{aligned} & \underset{P_g, Q_g}{\text{Min}} C(P_g) \\ & \text{s.a. } (P_g, Q_g) \in S \quad (7) \\ & P_g \geq P_g^b = GD \cdot e \end{aligned}$$

El conjunto  $S$  denota la región de seguridad del sistema de potencia en el espacio de generación  $(P_g, Q_g)$ . Esta región es definida por el rango de generación activa y reactiva  $P_g^{\min} \leq P_g \leq P_g^{\max}$  y  $Q_g^{\min} \leq Q_g \leq Q_g^{\max}$ , por los limites en la magnitud del voltaje en cada barra  $V^{\min} \leq V \leq V^{\max}$ , por las ecuaciones de flujo de potencia (punto de operación)  $P_g = P_d + P(\delta, V)$  y  $Q_g = Q_d + Q(\delta, V)$  y por los límites de flujo de potencia en las líneas  $|P_f(\delta, V)| \leq P_f^{\max}$

El componente de generación de bolsa puede ser encontrado a partir de la generación bilateral programada, esto es

$$P_g^p = P_g - P_g^b \quad (8)$$

Nótese que en (7) la única diferencia con respecto al FPO tradicional es el vector de desigualdad  $P_g \geq P_g^b$ , el cual establece los niveles de generación mínima dictada por el contrato bilateral.

## 2.3. Precios nodales en bolsa y tarifas de contratos bilaterales

Bajo la teoría de precio marginal las tarifas cargadas por los generadores y pagadas por las cargas (en \$/MWh) son precios nodales dados por los multiplicadores de Lagrange asociados a las ecuaciones de flujo de carga de potencia activa en (7). Además se asume que los precios para los contratos bilaterales negociados privadamente

$GD_{ij}$  pueden variar de una transacción a otra y son representados por  $\pi_{ij}$ .

Se asume que para cada carga del generador es la misma tarifa para todos sus contratos y estos, son evaluados en sus costos de generación marginal y en su salida bilateral total.

$$\pi_{ij} = \frac{dC_i}{dP_{gi}}(P_{gi}^b) \quad \forall j \quad (9)$$

**2.4. Ganancias y gastos del generador**

El generador  $i$  tiene dos fuentes de ganancias, las cuales corresponden a cada una de sus dos componentes: la bolsa y la generación bilateral.

$$R_{gi}^p = \lambda_i \cdot P_{gi}^p \quad (10)$$

El segundo componente de la ganancia es derivado del contrato bilateral entre el generador  $i$  y todas las cargas  $j$ .

$$R_{gi}^b = \sum_{j=1}^n \pi_{ij} GD_{ij} \quad (11)$$

Dos tipos de gasto pueden ser definidos para el generador  $i$ : El costo total de operación  $C_i(P_{gi})$  y pagos por transferencia de potencia contratada bilateralmente desde el punto de inyección  $i$  a el punto de recepción  $j$ , este es definido por  $E^{bcl}/2$  donde  $bcl$  significa “congestión bilateral / pérdidas”.

El costo incremental de potencia transfiriéndose del bus  $i$  al bus  $j$  es igual a la diferencia en precios nodales, es decir  $\lambda_j - \lambda_i$ , lo cual en términos de precios marginales, llega a ser la proporción cargada por la bolsa al intercambio bilateral  $GD_{ij}$ .

El correspondiente pago por transferencia de potencia esta dado por:

$$E^{bcl} = (\lambda_j - \lambda_i)GD_{ij} \quad (12)$$

Aquí, el pago de transferencia de potencia asignada al generador  $i$  es  $E^{bcl}/2$ , con la misma cantidad abonada a la carga  $j$ . Nótese que si el pago de transferencia de potencia es negativo, entonces la bolsa reembolsará la

parte concerniente (esta situación puede ocurrir si un contrato particular reduce la congestión o las pérdidas).

La ganancia neta del generador  $i$  (excluyendo costos operacionales) es:

$$R_{gi} = R_{gi}^p + R_{gi}^b - \sum_{j=1}^n \frac{E_{ij}^{bcl}}{2} = \lambda_i(P_{gi} - P_{gi}^b) + \sum_{j=1}^n \pi_{ij} GD_{ij} - \sum_{j=1}^n \frac{E_{ij}^{bcl}}{2} \quad (13)$$

Usando (4) y (12),  $R_{gi}$  puede ser expresado de la siguiente forma:

$$R_{gi} = \lambda_i P_{gi} + \sum_{j=1}^n \left[ \pi_{ij} - \frac{\lambda_i + \lambda_j}{2} \right] GD_{ij} = \hat{R}_{gi}^p + \hat{R}_{gi}^b \quad (14)$$

El primer termino  $\hat{R}_{gi}^p$  indica la ganancia que podría haber sido recolectada teniendo toda la salida de generación vendida al precio de bolsa actual  $\lambda_i$ . El segundo término en la expresión (14)  $\hat{R}_{gi}^b$ , el cual puede ser positivo o negativo, mide que tan bien se ajustan las tarifas bilaterales  $\pi_{ij}$  comparadas con el promedio de precios nodales  $\frac{\lambda_i + \lambda_j}{2}$ . Si el término de ganancias

$\hat{R}_{gi}^b$  pasa a ser negativo, en futuras negociaciones, el generador podría claramente reevaluar sus precios de venta bilateral o las cantidades contratadas.

**2.5. Ganancias y gastos de la carga.**

En este documento la demanda es asumida conocida (demanda inelástica), por lo tanto no se considerarán las ganancias de la carga. El primer término de gasto de la carga  $j$  corresponde al componente de demanda de bolsa,  $P_{dj}^p$ , el cual es cargado al precio nodal  $\lambda_j$ , esto es:

$$E_{dj}^p = \lambda_j \cdot P_{dj}^p \quad (15)$$

El segundo término es el pago bilateral contratado a las tarifas acordadas privadamente  $\pi_{ij}$ , esto es:

$$E_{dj}^b = \sum_{i=1}^n \pi_{ij} GD_{ij} \quad (16)$$

Finalmente la carga  $j$  es responsable por la mitad de los gastos de transferencia de potencia definidos en (12) o  $E_{ij}^{bcl} / 2$ . Los gastos totales de la carga  $j$ , análogamente a (13) y usando (2) y (16) son:

$$E_{dj} = \lambda_j P_{dj}^p + \sum_{i=1}^n \left( \pi_{ij} - \frac{(\lambda_j + \lambda_i)}{2} \right) GD_{ij} \quad (17)$$

$$E_{dj} = \hat{E}_{dj}^p + \hat{E}_{dj}^b$$

$\hat{E}_{dj}^p$  indica la cantidad pagada por la carga  $j$  teniendo toda la demanda de potencia siendo comprada a la bolsa al precio de bolsa actual  $\lambda_j$ . El segundo término en la expresión (17)  $\hat{E}_{dj}^b$ , el cual puede ser positivo o negativo, mide que tan bien se ajustan las tarifas bilaterales  $\pi_{ij}$  comparadas con el promedio de precios nodales.

### 3. CONTRATOS FIRMADOS Y NO FIRMADOS CON POSIBILIDAD DE ACORTAMIENTO

Dos tipos de contratos bilaterales pueden coexistir con la demanda de bolsa, los cuales son, firmados y no firmados. Similarmente, dos tipos adicionales de ofertas de bolsa son introducidas, las cuales son llamados; reducción de oferta de contratos firmados y no reducción de oferta de contratos no firmados.

Este mecanismo de ofertas permite a la parte bilateral modificar su operación y alcanzar una operación más eficiente. Los resultados demuestran que la flexibilidad introducida por la oferta racionada de contratos bilateral puede mejorar las medidas del desempeño financiero de todos los mercados participantes, no solamente los que están directamente involucrados en reducción de ofertas.

#### 3.1. Combinación bolsa / despacho bilateral con opciones de reducción y no-reducción

Los contratos bilaterales pueden ser ahora de dos tipos; firmados y no firmados. El contrato solicitado (requested) antes de la reducción por la bolsa está denotado por las matrices  $GDF^{req}$  para los acuerdos firmados y  $GDNF^{req}$  para los no firmados. Los valores de programación actual después de la reducción son denotados respectivamente, por las matrices  $GDF$  y  $GDNF$ . Entonces, la matriz total de contratos bilaterales programados es

$$GD = GDF + GDNF \quad (18)$$

Por lo tanto, en la curva de ofertas  $C_i(P_{gi})$ , el generador  $i$  puede sugerir una oferta de reducción (en dólares por MegaWatts-hora)  $bf_{gij}^f$  por el contrato firmado  $GDF_{ij}$  y una oferta de no-reducción  $bnf_{gij}^f$  por el contrato no firmado  $GDNF_{ij}$ . La carga  $j$  también proporciona dos ofertas análogas,  $bf_{dij}^f$  y  $bnf_{dij}^f$ . Las ofertas combinadas de ambos, generadores y cargas, son entonces:

$$bf_{ij}^f = bf_{gij}^f + bf_{dij}^f \quad \text{y} \quad bnf_{ij}^f = bnf_{gij}^f + bnf_{dij}^f \quad (19)$$

Estas ofertas son aplicadas de la siguiente manera. Si un contrato bilateral firmado es racionado desde su valor esperado, el ISO debe pagar al contrato el monto (en \$/h)

$$CF_{ij} = bf_{ij}^f (GDF_{ij}^{req} - GDF_{ij}^f) \quad (20)$$

Si un contrato bilateral no firmado es despachado en el nivel  $GDNF_{ij}^f \leq GDNF_{ij}^{req}$ , entonces la bolsa recibe desde el contrato la cantidad:

$$CNF_{ij} = bnf_{ij}^f GDNF_{ij}^f \quad (21)$$

Por lo tanto, se puede introducir una generalización que permite a la oferta variar con el monto reducido o programado. Entonces, el generador  $i$  permite dos conjuntos de parámetros para las ofertas reducidas  $bf_{gij}^{0}$  y  $bf_{gij}^{slope}$ , así que:

$$bf_{gij}^f = bf_{gij}^0 + bf_{gij}^{slope} (GDF_{ij}^{req} - GDF_{ij}^f) \quad (22)$$

y  $bnf_{gij}^0$  y  $bnf_{gij}^{slope}$  para sus ofertas reducidas, con:

$$bnf_{gij}^f = bnf_{gij}^0 + bnf_{gij}^{slope} GDNF_{ij}^f \quad (23)$$

La oferta de carga puede ser expresada similarmente.

La formulación general de la combinación bolsa/bilateral con opciones de reducciones y no-reducciones es:

$$\min_{P_g, Q_g, GDF, GDNF} C(P_g) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n bf_{ij}^f (GDF_{ij}^{req} - GDF_{ij}^f) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n bnf_{ij}^f \cdot GDNF_{ij}^f$$

$$\begin{aligned}
 s.a. \quad & (P_g, Q_g) \in S \\
 & 0 \leq GDF_{ij} \leq GDF_{ij}^{req} \\
 & 0 \leq GDNF_{ij} \leq GDNF_{ij}^{req} \\
 & P_g \geq P_g^b = (GDF + GDNF) \cdot e
 \end{aligned} \quad (24)$$

La solución del sistema anterior entrega la salida de generación  $P_g$  y los niveles de los contratos bilaterales firmados GDF y no firmados GDNF. Esto define la generación bilateral  $P_g^b = GD \cdot e$  y la generación de bolsa  $P_g^p = P_g - P_g^b$ , así como también la demanda de bolsa y bilateral respectivamente,  $P_d^p = P_d - P_d^b$  y  $P_d^b = GD^T \cdot e$ . La demanda total es considerada inelástica. Por lo tanto, en el mercado aquí propuesto, el modelo de contratos bilaterales no puede incrementar sus valores de reducciones por encima de los valores solicitados y como la demanda total es inelástica, la parte reducida de la demanda bilateral debe ser sustituida por la demanda de bolsa.

### 3.2. Ganancias y costos del generador

Las ganancias colectadas por el generador  $i$  por su salida de potencia son ganancias de la generación en bolsa y la ganancia de los contratos bilaterales.

$$R_{gi}^b = \sum_{j=1}^n \pi_{ij}^f GDF_{ij} + \sum_{j=1}^n \pi_{ij}^{nf} GDNF_{ij} \quad (25)$$

Aquí,  $\pi_{ij}^f$  y  $\pi_{ij}^{nf}$  son proporciones negociados privadamente entre socios del negocio bilateral, donde típicamente contratos no firmados tendrán mas baja proporción que los contratos firmados.

Adicionalmente se definen los siguientes gastos asociados con los contratos bilaterales:

- **situaciones firmadas pagadas.**  $E_{ij}^{ftr} = bf_{ij}^{tr} GDF_{ij}^{req}$

Donde  $bf_{ij}^{tr}$  es la tasa o proporción de la situación firmada aplicada al valor del contrato firmado solicitado  $GDF_{ij}^{req}$ . El pago de estado firmado garantiza que si un contrato firmado solicitado es reducido o cortado, este sera compensado de acuerdo a las ofertas de reducción.

Ambos tipos de contratos, firmados y no-firmados, son responsables por los pagos de transferencia de potencia definidos como:

- **Pagos de transferencia de potencia por contratos firmados programados**  $GDF_{ij}$  :

$$E_{ij}^{f bcl} = (\lambda_j - \lambda_i) GDF_{ij}$$

- **Pagos de transferencia de potencia por contratos no firmados programados**  $GDNF_{ij}$  :

$$E_{ij}^{f bcl} = (\lambda_j - \lambda_i) GDNF_{ij}$$

En este documento, el costo de transferencia de potencia costosa a contratos bilaterales es igualmente distribuido entre los dos socios del negocio (generador y carga). De esta forma, asumiendo una distribución de 50/50 los costos combinados correspondientes al generador  $i$  para todos sus contratos es:

$$E_{gi}^{bcl} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n (E_{ij}^{ftr} + E_{ij}^{f bcl} + E_{ij}^{f bcl})$$

El acortamiento y no acortamiento de la oferta tiene un impacto financiero en los participantes bilaterales. Cuando la modificación de un contrato ocurre, esta puede llegar a ser una fuente de ganancias o un costo adicional para las partes que negocian. Por lo tanto, para el generador  $i$ , dos términos adicionales son definidos de acuerdo a estas modificaciones de la oferta;  $bf_{gij}$  y  $bnf_{gij}$

- **Ganancia del ISO por el acortamiento del contrato firmado**

$$R_{gi}^f = \sum_{j=1}^n bf_{gij} (GDF_{ij}^{req} - GDF_{ij})$$

- **Pago al ISO por los contratos no firmados programados**

$$E_{gi}^{nf} = \sum_{j=1}^n bnf_{gij} \cdot GDNF_{ij}$$

Por lo tanto, el total de ganancias de red del generador  $i$  es.

$$R_{gi} = R_{gi}^p + R_{gi}^b - E_{gi}^{bcl} + R_{gi}^f - E_{gi}^{nf} \quad (26)$$

### 3.3. Ganancias y gastos de la carga

Usando el mismo racionamiento aplicado a los generadores, pueden ser implementados los siguientes indicadores de desempeño para la carga  $j$  :

Pagos por la demanda en bolsa

$$E_{dj}^p = \lambda_j P_{dj}^p$$

Pagos por el contrato bilateral negociado privadamente

$$E_{dj}^b = \sum_{i=1}^n \pi_{ij}^f GDF_{ij} + \sum_{i=1}^n \pi_{ij}^{nf} GDNF_{ij}$$

Gastos de la carga  $j$  para todos sus contratos es:

$$E_{di}^{bcl} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n (E_{ij}^{tr} + E_{ij}^{bcl} + E_{ij}^{bcl})$$

**Ganancia de la carga por el acortamiento del contrato firmado**

$$R_{di}^f = \sum_{j=1}^n b_{dij}^f (GDF_{ij}^{req} - GDF_{ij})$$

**Pago a la carga por los contratos no firmados programados**

$$E_{di}^{nf} = \sum_{j=1}^n b_{dij}^{nf} \cdot GDNF_{ij}$$

Por lo tanto, el total de pagos de la carga  $j$  es.

$$E_{di} = E_{di}^p + E_{di}^b + E_{di}^{bcl} - R_{di}^f + E_{di}^{nf} \quad (27)$$

#### 4. CONCLUSIONES

El modelo aquí estudiado se presentó como la evaluación de una adecuada coordinación y planeación de contratos bilaterales firmados en las cuales una pobre administración de la parte bilateral podría repercutir en la congestión del sistema. Dicha coordinación ha sido formulada como un FPO cuya función objetivo es el costo de generación y que esta sujeto a unas restricciones de transmisión y a unos límites mínimos de generación impuestos por los contratos bilaterales firmados.

El hecho de que los contratos bilaterales sean considerados no firmados, es decir, que se permita interrumpir o cortar el contrato, implica que el modelo matemático de optimización cambie drásticamente.

La metodología descrita proporciona información para ayudar al generador y los centros de carga a escoger apropiadamente cantidades de potencia de bolsa frente a potencia proveniente de negocios bilaterales o para redefinir las proporciones de la mezcla bolsa/bilateral.

Es necesario coordinar, a través del FPO, el funcionamiento de la mezcla entre contratos bilaterales y bolsa, para poder mejorar el desempeño económico conjunto del sistema.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

El grupo de planeamiento eléctrico agradece a la Universidad Tecnológica de Pereira por el apoyo prestado.

#### 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] GALIANA Francisco D., KOCKAR Ivana, CUERVO Franco Pablo, Combined Pool/Bilateral Dispatch – Part 1. Performance of Trading Strategies, IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 17 No 1. Febrero 2001.
- [2] KOCKAR Ivana, GALIANA Francisco D., Combined Pool/Bilateral Dispatch – Part 2. Curtailment of Firm and Nonfirm contracts, IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 17 No 4. Noviembre 2002.
- [3] GALIANA Francisco D., KOCKAR Ivana, CUERVO Franco Pablo, Combined Pool/Bilateral Dispatch – Part 3. Unbundling Costs of Trading Services, IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 17 No 4. Febrero 2002.
- [4] DOMMEL Hermann W., TINNEY William F. , *Optimal power flow solutions*, IEEE Transaction on Power Apparatus and System, October 1968.
- [5] SUN David I., ASHLEY Bruce, BREWER Brian , HUGHES Art, TINNEY W., *Optimal power flow by Newton*, IEEE Transaction on Power Apparatus and System, October 1984.
- [6] GRANADA E Mauricio, *Flujo de potencia Optimo Usando el Método del Gradiente*, Tesis de Grado, Universidad Tecnológica de Pereira, junio 2001.
- [7] GRANADA E. Mauricio, “Componentes de Precios Nodales para Sistemas Eléctricos de Potencia”, Revista Scientia et Technica No 20, Universidad Tecnológica de Pereira