

MODELO MATEMÁTICO PARA LAS TASAS DE TOMA DE CARGA Y DESCARGA DE LOS RECURSOS DE GENERACIÓN.

Oscar Mauricio Carreño R.

XM Compañía de Expertos en Mercados
Medellín, Colombia
e-mail: omcarreno@xm.com.co

En este trabajo se presenta el detalle del modelo matemático de programación entera mixta (PEM), para las tasas de toma de carga y descarga (TTCD) en MW/min de los recursos de generación (RG), incluyendo RG en los cuales las TTCD dependen del nivel de potencia (rampas dinámicas). Otros modelos de la literatura consideran las TTCD en MW/h, aproximando los cambios máximos de energía entre dos periodos consecutivos. Esta aproximación no modela de manera apropiada las características reales de los RG. El modelo desarrollado incluye restricciones que discretizan la variación máxima de energía en periodos de minutos, lo que permite tener una aproximación a la curva de potencia del RG durante cada periodo horario del DE.

Palabras clave: programación entera mixta, despacho económico, tasa de toma de carga, tasa de descarga

1. INTRODUCCIÓN

El Despacho Económico (DE) es ampliamente usado en la operación y administración de mercados de energía competitivos. El operador del mercado debe encontrar diariamente el programa de generación o despacho de cada RG atendiendo la demanda pronosticada en energía y minimizando el costo de operación del sistema. Este despacho es entregado con anterioridad a cada una de las empresas dueñas de los RG con el fin de que estos generen el valor del despacho. En [13] se desarrolla en detalle el problema de DE.

Los despachos deben tener en cuenta las características técnicas de los RG. Características como tiempo mínimo en línea (TML), tiempo mínimo fuera de línea (TMFL) y las TTCD, deben incluirse como restricciones en el problema de DE. Estas restricciones son difíciles de solucionar ya que involucran acople entre periodos de optimización.

En [2], se desarrolla un modelo de PEM eficiente para las restricciones de TML y TMFL. Para el modelo de las TTCD se han encontrado varias aproximaciones en la literatura. El modelo más común y que simplifica esta restricción, es modelar las TTCD como un cambio máximo de energía entre dos periodos de tiempo consecutivos.

$$g_{t,i} - g_{t-1,i} \leq UR_i \quad \forall t, i \quad (1)$$

$$g_{t-1,i} - g_{t,i} \leq DR_i \quad \forall t, i \quad (2)$$

Las ecuaciones 1 y 2 muestran el modelo más utilizado que será llamado de aquí en adelante: modelo simplificado. La variable $g_{t,i}$ representa el despacho en energía del RG i en el periodo t , UR_i es el cambio máximo de energía cuando el despacho del RG i incrementa en dos periodos consecutivos y DR_i es el cambio máximo de energía cuando el despacho del RG i disminuye. Los UR y DR están definidos para despachos entre el mínimo y el máximo técnico del RG. Luego las ecuaciones 1 y 2 no pueden ser utilizadas para los periodos de arranque y parada de los RG. Adicionalmente 1 y 2 no modelan adecuadamente las TTCD cuando se presentan algunos tipos de despachos y no pueden ser usadas tampoco para modelar RG con rampas dinámicas. Estos

inconvenientes son las principales motivaciones para este trabajo de investigación.

En [11] se desarrolla un modelo mas completo usando Relajación Lagrangeana. Este modelo incluye restricciones para el arranque en función de los parámetros de la caldera y rampas especiales de entrada. Dentro de este modelo se incluyen TTCD en MW/min pero no es involucrada como variable de decisión dentro del problema de optimización. Las TTCD son tratadas como un parámetro para calcular la máxima energía de cada periodo de arranque.

En [9] se propone un modelo de rampas dinámicas. Las restricciones son planteadas con un modelo de PEM, pero la variable que representa el despacho de los RG se plantea en potencia y no en energía. Luego no es posible modelar con estas restricciones el comportamiento en el tiempo de los RG.

Otros modelos matemáticos de artículos de la literatura [8], [6], [4], [5], [7], [12] plantean algoritmos de solución del problema de las TTCD usando las ecuaciones 1 y 2. Estos artículos se enfocan en desarrollar algoritmos eficientes para solucionar problemas de gran escala.

En [10] se hace un análisis económico del efecto de las TTCD en el DE.

En esta revisión bibliográfica no se encontró un modelo de TTCD en MW/min que represente con más exactitud el comportamiento real de los RG. El modelo simplificado es una buena aproximación pero como se muestra en [1], puede entregar despachos infactibles para los RG. Para el operador del sistema eléctrico resulta inconveniente entregar despachos a los RG que no pueden cumplir ya que las generaciones reales de dichos RG estarán por debajo o por encima del despacho. En algunos mercados eléctricos como el colombiano, estas diferencias entre el despacho y la generación real son castigadas con penalizaciones económicas. Esto hace necesario modelar de una manera más precisa las TTCD en el DE con el fin de que los despachos obtenidos siempre sean factibles.

En este artículo se desarrolla una formulación matemática en programación entera mixta para modelar las TTCD de los RG incluyendo rampas dinámicas .

2. Modelo Matemático

El modelo desarrollado para las restricciones de TTCD en MW/min , esta basado en PEM. La idea principal es discretizar los periodos horarios en subperiodos más pequeños. En general estos subperiodos pueden tener cualquier tamaño. Para el desarrollo de este trabajo de investigación serán subperiodos de minutos. Esto implica que cada periodo horario se divide en 60 subperiodos de 1 minuto, permitiendo obtener la curva aproximada de potencia del RG durante el periodo horario y controlando los cambios de generación en cada minuto.

En la Figura 1 se muestran los espacios de discretización para modelar las TTCD en MW/min . En cada subperiodo k el RG puede moverse en el espacio de solución mostrado en las áreas sombreadas de la Figura 1 (b). Se requiere entonces controlar esta variación en el modelo matemático según el parámetro de TTCD en MW/min .

$$p_{t,i,k} - p_{t,i,k-1} \leq TC_i \quad \forall t, i, k \quad (3)$$

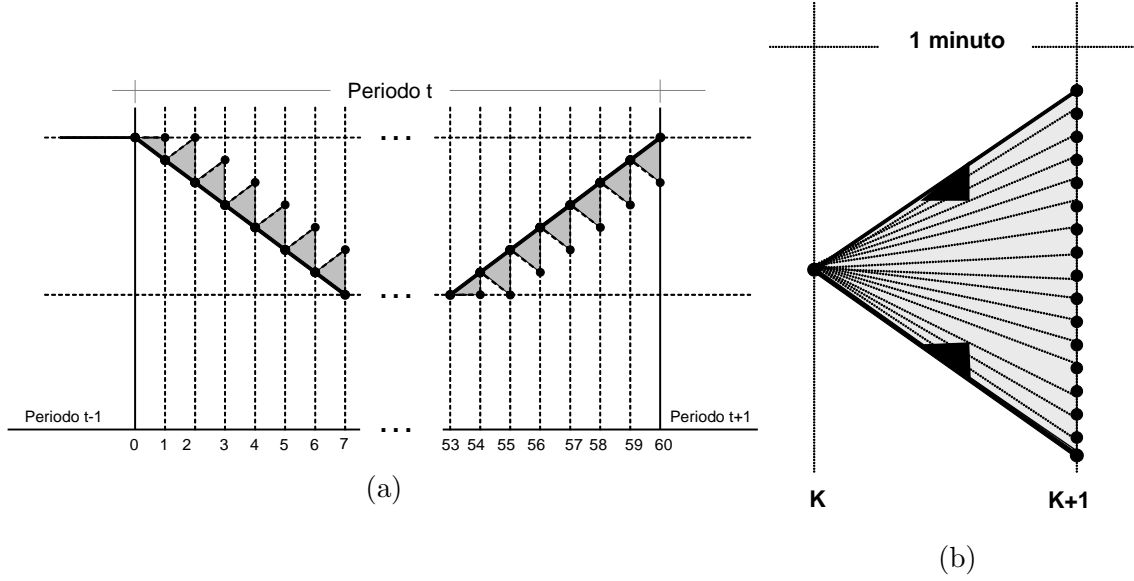


Figura 1: Espacio de solución de la discretización en subperiodos

$$p_{t,i,k-1} - p_{t,i,k} \leq TD_i \quad \forall t, i, k \quad (4)$$

Las ecuaciones 3 y 4 muestran las restricciones que controlan la variación del despacho entre dos periodos consecutivos. La variable $p_{t,i,k}$ representa la aproximación del nivel de potencia en MW/min en la que se encuentra el RG i en el periodo t y en cada discretización k . Como se mencionó anteriormente, el número de subperiodos K puede ser variable. Para este trabajo de investigación se define $K = 60$. Los parámetros TC_i y TD_i son las TTCD declaradas por cada RG i , expresados en MW/min . Estas ecuaciones son similares a las ecuaciones 1 y 2. La diferencia radica en que las ecuaciones 3 y 4 controlan las variaciones en MW/min .

Es necesario incorporar límites para la variable $p_{t,i,k}$ y restringirlas al rango entre el mínimo técnico y máximo técnico declarados por el RG.

$$p_{t,i,k} - \bar{P}_{t,i} \cdot u_{t,i} \leq 0 \quad \forall t, i, k \quad (5)$$

$$p_{t,i,k} - \underline{P}_{t,i} \cdot u_{t,i} \geq 0 \quad \forall t, i, k \quad (6)$$

En las ecuaciones 5 y 6 se muestran dichos límites. La variable binaria $u_{t,i}$ representa el estado de encendido o apagado del RG. Si bien este conjunto de restricciones controlan efectivamente el cambio de potencia del recurso de generación, es necesario relacionar por medio de una restricción las variables de potencia y energía, ya que la demanda del sistema eléctrico se pronostica en energía y no en potencia. Las siguientes ecuaciones muestran esta restricción de balance potencia-energía.

$$\frac{1}{K} \cdot p_{t-1,i,K} \quad (7)$$

$$+ \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=2}^K p_{t,i,k-1} \quad (8)$$

$$+\frac{1}{2 \cdot K} \cdot (p_{t,i,1} - p_{t-1,i,K}) \quad (9)$$

$$+\frac{1}{2 \cdot K} \cdot \sum_{k=2}^K (p_{t,i,k} - p_{t,i,k-1}) \quad (10)$$

$$= g_{t,i} \quad \forall i, t$$

Cada sumatoria representa un área específica de la Figura 2. Esta es la energía en *MWh* de cada subperiodo.

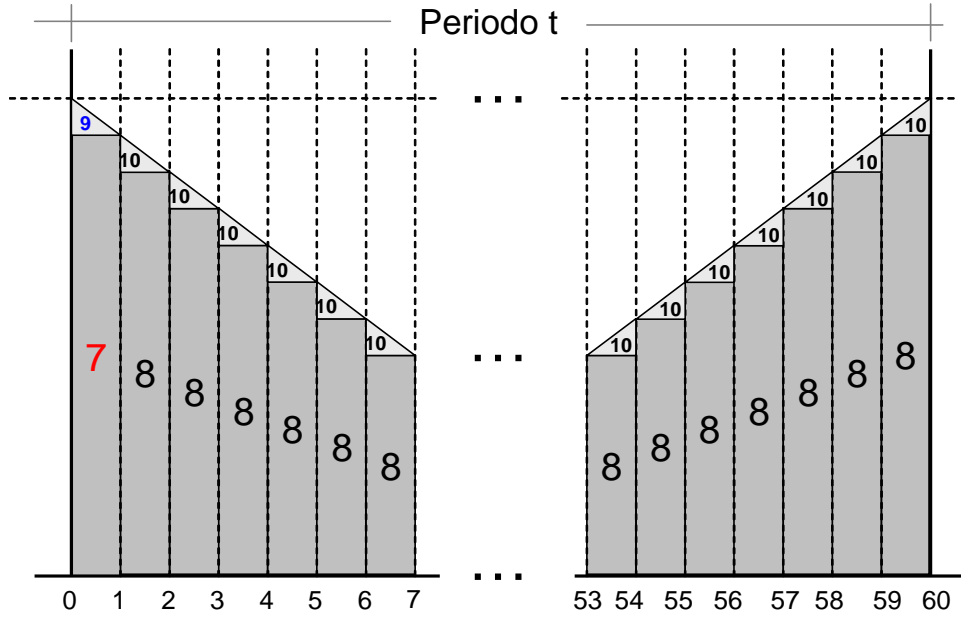


Figura 2: Area o energía correspondiente a cada ecuación de la restricción de balance potencia-energía

Haciendo algunas simplificaciones de términos La ecuación 2 puede expresarse de una manera mas compacta como se muestra en 11.

$$p_{t-1,i,K} + p_{t,i,K} + 2 \cdot \sum_{k=1}^{K-1} p_{t,i,k} = 2 \cdot K \cdot g_{t,i} \quad \forall t, i \quad (11)$$

Hasta el momento se tiene modelado la TTCD de los RG para un solo valor declarado. Algunos RG poseen características especiales que hacen variar su TTCD dependiendo el valor de potencia en el que se encuentren. Este concepto se conoce en la literatura como Rampas Dinámicas. Las rampas dinámicas son comunes para RG que poseen sistemas para aumentar su potencia máxima. Este es el caso de los Wet Compression, que son sistemas de inyección de agua para reducir el trabajo del compresor y aumentar la potencia de salida del RG. Normalmente la TTCD una vez activado el sistema de enfriamiento es mucho menor.

$$p_{t,i,k} - \sum_{l=1}^S \bar{S}_{i,l} \cdot ub_{t,i,k,l} \leq 0 \quad \forall i, t, k \quad (12)$$

$$p_{t,i,k} - \sum_{l=1}^S \underline{S}_{i,l} \cdot ub_{t,i,k,l} \geq 0 \quad \forall i, t, k \quad (13)$$

$$\sum_{l=1}^S ub_{t,i,k,l} \leq u_{t,i} \quad \forall i, t, k \quad (14)$$

Para modelar este tipo de características se plantean las ecuaciones 12, 13 y 14. El parámetro S representa el número de segmentos de TTCD declarado por el RG. Cada uno de estos segmentos debe estar acompañado de un límite máximo $\overline{S}_{i,l}$ y un límite mínimo $\underline{S}_{i,l}$ que representan el rango de potencia para las diferentes TTCD. Se adiciona la variable binaria $ub_{t,i,k,l}$ para controlar la activación de cada uno de estos segmentos S .

Se hace necesario acoplar las ecuaciones 12, 13 y 14 a las restricciones de variación de potencia representadas en las ecuaciones 3 y 4.

3. CONCLUSIONES

El modelo desarrollado refleja de una forma más precisa el comportamiento de los RG en el DE, obteniendo siempre despachos factibles en la operación real. Adicionalmente se incluyen rampas dinámicas que permiten la inclusión de RG con TTCD dependientes del nivel de potencia.

Estas restricciones pueden ser incorporadas al DE de cualquier mercado eléctrico que requiera modelar de una manera más precisa las TTCD de los RG. Esto puede ser de gran ayuda ya que se pueden disminuir las desviaciones entre la generación y la demanda en la operación real de los sistemas eléctricos y se evitan las penalizaciones para los RG que no cumplan los despachos programados.

El modelo propuesto aumenta de manera considerable el número de variables y restricciones en el problema de DE, aunque en pruebas iniciales en el sistema colombiano se han obtenido tiempos de ejecución similares a los obtenidos con el modelo simplificado.

REFERENCIAS

- [1] Oscar M. Carreno, *Dera: Despacho económico con rampas automáticas*, Universidad de los Andes, Bogotá D.C (2007).
- [2] Miguel Carrión and Jose M. Arroyo, *A computationally efficient mixed-integer linear formulation for the thermal unit commitment problem*, IEEE Transactions on Power Systems **21,3** (2006).
- [3] Consejo Nacional de Operación CNO, www.cno.org.co, *Acuerdo 270*, julio 2003.
- [4] Wei Fan, Xiaohong Guan, and Qiaozhu Zhai, *A new method for unit commitment with ramping constraints*, Electric Power Systems Research (2002).
- [5] M. Ferreira, T. Andersson, F. Imparato, and A. Svoboda, *Short-term resource scheduling in multi-area hydrothermal power systems*, Electrical Power & Energy Systems **11,3** (1989).
- [6] Yong Fu, M.S Shahidehpour, and Zuyi Li, *Security-constrained unit commitment with ac constraints*, IEEE Transactions on Power Systems **20,3** (2005).

- [7] X.S Han, .B Gooi, and Daniel S. Kirschen, *Dynamic economic dispatch: Feasible and optimal solutions*, IEEE Transactions on Power Systems **16,1** (2001).
- [8] Shih-Yih Lai and Ross Baldick, *Unit commitment with ramp multipliers*, IEEE Transactions on Power Systems **14,1** (1999).
- [9] Tao Li and M.S Shahidehpour, *Dynamic ramping in unit commitment*, IEEE Transactions on Power Systems **22,3** (2007).
- [10] Shmuel S. Orden and Andrew M. Ross, *Can we prevent the gaming of ramp constraints?*, Decision Support Systems (2004).
- [11] W.L. Peterson and S.R Brammer, *A capacity based lagrangian relaxation unit commitment with ramp rate constraints*, IEEE Transactions on Power Systems **10,2** (1995).
- [12] Alva J. Svoboda, Chung-Li Tseng, Chao an Li, and Raymond B. Johnson, *Short-term resource scheduling with ramp constraints*, IEEE Transactions on Power Systems **12,1** (1997).
- [13] Allen J. Wood and Bruce F. Wollenberg, *Power generation, operation, and control*, John Wiley & sons, 1996.