

# Modelo de despacho de energía eléctrica en períodos de tiempo de 15 minutos

D. Restrepo, *Estudiante, UdeA*, L.M. Tobón, *Estudiante, UdeA*, S. Giraldo, *Estudiante, UdeA*

**Resumen**— El objetivo principal del despacho de energía eléctrica es determinar la operación de un sistema eléctrico mediante la asignación óptima de la demanda total del sistema entre las diferentes unidades de generación. Este despacho de energía eléctrica se podrá realizar en diferentes periodos de tiempo según el marco regulatorio del país y los requerimientos energéticos del mismo. Para este caso en particular, se desarrolló un modelo de despacho con su respectiva formulación matemática, función objetivo y restricciones que permitan el despacho de energía eléctrica de una unidad de generación en un periodo de tiempo equivalente a 15 minutos.

**Palabras claves**— Despacho, Energía eléctrica, 15 minutos, Unidad de generación.

**Abstract**— The main objective of electric power dispatch is to determine the operation of an electrical system by optimally allocating the total demand of the system among the different generation units. This dispatch of electrical energy may be carried out in different periods of time according to the regulatory framework of the country and its energy requirements. For this particular case, a dispatch model was developed with its respective mathematical formulation, objective function, and restrictions that allow the dispatch of electrical energy from a generation unit in a period of time equivalent to 15 minutes.

**Keywords**— Dispatch, Electrical energy, 15 minutes, Generation unit.

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el despacho eléctrico se realiza haciendo una programación de la generación para cubrir una demanda esperada, buscando como resultado la utilización de recursos a un menor precio por cada hora.

Con el auge de las energías renovables como instalaciones solares fotovoltaicas y eólicas, la disponibilidad del recurso energético es variable en más periodos de tiempo, por esto se propone un proceso de optimización donde se efectúe la optimización de recursos energéticos cada 15 minutos.

A la hora de realizar un despacho económico se deben cumplir unas condiciones límites en los sistemas de potencia en cuanto a transferencia de energía, disponibilidad de generador, como tiempos de arranque de las centrales de generación térmica, siendo variables y restricciones que limitan y se juegan un papel importante en optimización de costo. Se presenta en el presente documento un modelo matemático para el despacho y optimización de recursos energéticos que cumplen con los menores precios de operación.

## II. OBJETIVOS

### A. Objetivo General

Elaborar un modelo matemático de despacho de energía eléctrica para una unidad de generación en periodos de tiempo de 15 minutos.

### B. Objetivos Específicos

Evaluar sobre condiciones y parámetros reales, la viabilidad teórica de la modificación del despacho a periodos de tiempo de 15 minutos.

Ampliar de 24 a 96 los períodos de demanda y verificar que en el despacho esta se satisface en todo periodo de tiempo.

Verificar el impacto que tiene la modificación que tienen los parámetros UR y DR en las centrales térmicas, si la regulación se modifica a periodos de 15 minutos.

## III. MARCO TEÓRICO

El Sistema Eléctrico Colombiano consiste en una red interconectada que atiende un aproximado del 99% de la demanda total del país. El 1% restante se satisface con generación en sitio – propia.

La generación de energía eléctrica durante el año 2018 se dividió en la siguiente matriz energética equivalente a: 86.01% agua, 9.62% gas, 3.60% carbón, 0.02% ACPM, y 0.01% radiación solar. [1]

Luego de la reestructuración que se realizó en el mercado eléctrico colombiano en la década de los 90, con la implementación de las leyes 142 y 143, cuatro tipos de agentes participan y componen el mercado eléctrico del país: generadores – productores, distribuidores, transmisores y comercializadores. La Bolsa de Energía es administrada por XM compañía filial de ISA y sus actividades son controladas por la CREG. Los únicos participantes activos de La Bolsa de Energía son los productores y las compañías comercializadoras.

### **ESQUEMA GENERAL DEL DESPACHO DE ELECTRICIDAD**

El despacho eléctrico se inicia con un periodo de planeación y división temporal. La división del periodo de planeación se define en múltiplos de días y se hace con base horaria.

La demanda en el sistema varía constantemente en el tiempo y las plantas en servicio deben seguir y cubrir instantáneamente esas variaciones, razón por la cual debe existir una excelente coordinación entre los cambios previstos de carga según la curva de demanda resultante y la velocidad con que las diferentes unidades pueden responder a dichos cambios. Para lograr el cubrimiento de la demanda de potencia activa conectada a la red en cada instante de tiempo en forma satisfactoria, eliminando o minimizando en lo posible los riesgos de racionamiento y las pérdidas resultantes, se adaptan las unidades dispuestas para suplir la demanda mediante un proceso de optimización que cubra un periodo de tiempo adecuado de acuerdo a las necesidades de estudio [2].

Como los costos de operación dependen de la cantidad de potencia activa generada en las plantas y las pérdidas totales dependen de los flujos de corriente por las líneas y las características eléctricas de estas, entonces determinar el estado de generación de potencia activa que corresponde a un estado de carga debe realizarse sobre la base que: tanto la suma de los costos de operación de las plantas como la suma de las pérdidas totales sean mínimas. [3]

Se evalúan los criterios de confiabilidad y seguridad que se establecen para la operación del sistema eléctrico en los diferentes estados en los que pueda estar sometido. Éste deberá ser operado con márgenes adecuados de reserva, para que, ante una contingencia, no existan

problemas de estabilidad angular, estabilidad de voltaje, estabilidad de frecuencia, ni operación del equipo fuera de sus límites de diseño. Es decir, que el sistema permanezca estable, para cumplir con los criterios operativos de seguridad, calidad y continuidad.

### **DESPACHO ECONÓMICO DE ENERGÍA EN COLOMBIA**

El despacho económico determina la generación necesaria para cada hora del día usando la oferta de precios declarada, las restricciones de transmisión (representadas por los límites de intercambio del modelo de transmisión), las restricciones locales y regionales (representadas por la confiabilidad de generación), la reserva de AGC (Control Automático de Generación) y las características de las unidades generadoras y previsión de la demanda. El CND (Centro Nacional de Despacho) determina la relación de despacho óptimo para cada unidad térmica e hidráulica para las próximas 24 horas del día siguiente. [4]

### **BOLSA DE ENERGÍA**

Esta se compone de un proceso operativo y otro comercial. El primero, parte del planeamiento operativo, sigue con el despacho económico y termina con la coordinación de la operación y redespacho. El proceso comercial se inicia con los datos del despacho real y las medidas de generación y consumo por parte de los respectivos agentes, con los cuales el Sistema de Intercambios Comerciales (SIC) realiza la liquidación, de acuerdo con la reglamentación. [5]

### **PROCESO OPERATIVO**

**1. Plan Operativo Indicativo:** El objetivo es establecer el costo, teniendo en cuenta la posibilidad de racionamiento en el futuro, de acuerdo con las características de regulación. La evaluación se hace a largo y mediano plazo. En el largo plazo (cinco años con resolución mensual), se usa Programación Dinámica Estocástica para encontrar las decisiones de generación que resulten en una operación de mínimo costo. En el mediano plazo (un mes con resolución horaria y semanal) se usan métodos de Programación Lineal para encontrar las decisiones óptimas.

**2. Declaración de disponibilidad y precio oferta:** Todos los días, cada agente generador hace una oferta de precio (en \$/MWh) y la declaración de disponibilidad (en MW) de cada uno de sus recursos de generación, para cada una de las 24 horas siguientes, en un buzón

electrónico dispuesto para ese efecto en el CND en Medellín. Luego se abre el buzón para establecer el programa de generación. Para los recursos que no se hayan realizado ofertas, se toma la oferta del día anterior.

Las ofertas y la disponibilidad de cada agente son de consulta pública. Si el nivel de un embalse se encuentra por debajo del nivel mínimo operativo superior (MOS), la oferta se interviene cambiándose por el valor de la oferta más alta más 1 \$/MWh. Esto se hace para cubrir la demanda con adecuada confiabilidad, asegurando un nivel de reservas.

**3. Redespacho:** Durante el día se pueden presentar eventos en el sistema que requieren el cambio de programa inicial, lo que da origen al redespacho.

Son causas de redespacho la salida de unidades, aumento de disponibilidad por entrada de unidades que se encontraban en mantenimiento, cambio de los límites de transferencia ocasionados por el cambio en la configuración de la red, cambios mayores de 20 MW en la demanda y aumento o disminución de aportes a las centrales filo de agua.

**4. Despacho Programado:** Su principal objetivo consiste en repartir la demanda total del sistema entre los generadores disponibles, de forma que el costo total de generación sea el mínimo posible, tomando en cuenta los criterios de confiabilidad, la disponibilidad de los elementos del sistema de potencia y las posibles inflexibilidades del sistema con el fin de minimizar el costo variable de la operación; ya que los costos fijos de una central pueden ser altos, no es viable económicamente operar a un nivel de producción bajo, entonces es preferible desacoplar ciertas centrales generadoras cuando hay poca demanda.

El despacho programado es el resultante de los redespachos realizados durante el día de operación. Se utiliza como referencia para identificar las desviaciones que presenta la generación real de cada unidad térmica o planta hidráulica. La información de despacho programado y de otras variables de estado del sistema es suministrada a los agentes diariamente y puede ser usada para definir las ofertas del día siguiente. [3]

## ETAPAS DEL DESPACHO PROGRAMADO

Los pasos establecidos por la resolución 062 de 2000 de la CREG para el cálculo del despacho son [6]:

**1. Predespacho ideal:** Es la programación de generación que se realiza a posteriori por el Sistema de

Intercambios Comerciales (SIC), la cual atiende la demanda real con la disponibilidad real de las plantas de generación. Este despacho se realiza considerando la oferta de precios por orden de mérito de menor a mayor, sin considerar las diferentes restricciones que existen en el sistema, excepto por las condiciones de inflexibilidad de las plantas generadoras.

En esta primera etapa ya que no se tienen en cuenta las restricciones eléctricas simplemente se cumple con la demanda pronosticada asignando carga a los generadores en orden de mérito.

**2. Predespacho programado:** En este caso el CND resuelve el problema de optimización, sujeto a estas nuevas restricciones:

- Límites de flujo de potencia en las líneas
- Límites mínimos y máximos de generación
- Límites de tensión en las barras
- Límites de velocidad de toma de carga de las unidades.

Al incluir estas restricciones dentro del problema de optimización, se obtiene un esquema de despacho más costoso. La diferencia en el valor de la función objetivo para ambos problemas (con y sin restricciones) representa el costo de las restricciones eléctricas para el sistema, también llamado costo de seguridad del sistema.

**3. Despacho Programado Preliminar:** Este despacho incluye la consideración del VERPC (Valor Esperado de Racionamiento Programado Condicionado).

**4. Despacho programado:** El CND calcula el despacho programado para cada una de las 24 horas, mediante procedimientos de optimización diaria, tomando como referencia el Despacho Programado Preliminar. Éste debe cumplir con las inflexibilidades de las plantas o unidades de generación programadas y con los requerimientos de Control Automático de Generación (AGC, Automatic Generation Control) según la reglamentación vigente (resolución CREG 026 de 2001). [3]

## DESPACHO PROGRAMADO COMO PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

La optimización en el despacho económico, surge a partir del momento en que dos o más generadores deben alimentar varias cargas obligando al operador a decidir cómo se reparte ésta de forma óptima entre las distintas unidades. Los primeros esfuerzos de optimización se hicieron respecto al control de generación, lo que hoy se conoce como Despacho Económico Clásico. [7]

Para obtener un programa eficiente que cumpla con los criterios de confiabilidad y seguridad para la generación de los recursos y de las transacciones internacionales de electricidad de corto plazo (TIE), el CND desarrolló una aplicación, llamada DRP (Despacho y Redespacho Programado), que permite encontrar el despacho óptimo para atender la demanda de energía [8].

El problema de despacho es resuelto utilizando técnicas de optimización de Programación Entera Mixta (MIP) minimizando el costo operativo del sistema sujeto a las características técnicas de las unidades de generación, la reserva secundaria de frecuencia y las restricciones de la red eléctrica en régimen permanente. [3]

## V. PROCEDIMIENTO

Para llevar a cabo el despacho de energía en periodos de tiempo de 15 minutos, se utilizó la siguiente metodología de trabajo:

1. En una primera instancia y con el objetivo principal de simular una situación real en cuanto a demanda, generación, precios y demás variables de interés, se trabajó con los datos reales del día 29 de octubre del año 2020. Esta información fue encontrada en el sitio web del operador XM ([www.xm.com.co](http://www.xm.com.co)). Dicha información fue manipulada y trabajada utilizando el software Excel, el archivo resultante estará como anexo al presente artículo.

2. Como la información de demanda suministrada al público por el operador XM está distribuida por día en 24 periodos equivalente a la regulación horaria que a hoy se sigue trabajando, se realizó un proceso de interpolación lineal con el fin de encontrar 4 periodos por hora con lapsos de tiempo de 15 minutos, lo que equivalen a 96 periodos durante el día. A continuación, se muestra la demanda del día 29 de octubre con periodos de tiempo de 15 minutos:

TABLA I.  
DEMANDA A SATISFACER EN LOS 96 PERÍODOS DEL DÍA

P	D	P	D	P	D
1	7445	33	8713	65	9148
2	7381	34	8735	66	9173
3	7316	35	8757	67	9197
4	7252	36	8779	68	9222
5	7187	37	8801	69	9246
6	7146	38	8887	70	9468
7	7105	39	8973	71	9691
8	7063	40	9059	72	9913
9	7022	41	9145	73	10135
10	7006	42	9218	74	10156

11	6990	43	9290	75	10177
12	6973	44	9363	76	10197
13	6957	45	9435	77	10218
14	6989	46	9428	78	10165
15	7022	47	9421	79	10112
16	7054	48	9406	80	10059
17	7086	49	9406	81	10006
18	7119	50	9398	82	9764
19	7152	51	9389	83	9522
20	7185	52	9381	84	9279
21	7218	53	9372	85	9037
22	7264	54	9384	86	8926
23	7311	55	9396	87	8815
24	7357	56	9407	88	8704
25	7403	57	9419	89	8593
26	7576	58	9409	90	8455
27	7749	59	9400	91	8317
28	7922	60	9390	92	8178
29	8095	61	9380	93	8040
30	8250	62	9322	94	8040
31	8404	63	9264	95	8040
32	8559	64	9206	96	8040

Donde:

**P:** Periodo.

**D:** Demanda.

3. Se tomaron todos los generadores inscritos al SIN y sus respectivas ofertas en cuanto al máximo y mínimo disponible de generación con los precios para los 96 periodos equivalentes a un día.

Por motivos prácticos, nos centraremos en 3 centrales de generación térmica, las cuales son: GECELCA 3, TASAJERO 2 (Carbón) y TERMOCANDELARIA 1 (Gas). Estas 3 centrales de generación ofertaron el día 29 de octubre del 2020 a un precio de:

TABLA II.  
PRECIO DE OFERTA DE LAS CENTRALES TÉRMICAS

Recurso	Precio
Gecelca3	\$ 181.678
Tasajero2	\$ 139.980
TCandel1	\$ 624.014

4. Para estas 3 centrales de generación térmica, se procede a encontrar los parámetros de UR y DR (Velocidad de toma de carga y velocidad de descarga), TML (tiempo mínimo en línea), TMFL (tiempo mínimo fuera de línea) y su respectivo costo de arranque.

Los parámetros de las unidades de generación UR, DR, TML, y TMFL fueron encontrados en los formatos para declaración de parámetros de plantas térmicas emitidos por estas centrales de generación.

A continuación, en la TABLA III, se muestra esta información:

TABLA III.  
PARÁMETROS TÉCNICOS DE LAS CENTRALES TÉRMICAS

Recurso	TML	TMFL	UR	DR
Gecelca3	24	24	15	9
Tasajero2	24	8	23.55	23.55
TCandel1	5	8	75	75

Así mismo, se procedió a encontrar el costo de arranque de cada una de las 3 centrales de generación térmica de interés. Esta información fue encontrada en la página web del operador XM ([www.xm.com.co](http://www.xm.com.co)). A continuación, en la TABLA IV, se muestra esta información:

TABLA IV.  
COSTO DE ARRANQUE DE LAS CENTRALES TÉRMICAS

Recurso	Costo de arranque
Gecelca3	172'808.441
Tasajero2	55'125.752
TCandel1	87'103.873

5. Con toda la información ya organizada adecuadamente en el archivo Excel, se procede entonces a ejecutar y a realizar el proceso de optimización del despacho en periodos de tiempo de 15 minutos. Para realizar esto, se utilizó el lenguaje de programación Python, y se programó la siguiente formulación matemática del despacho.

$$\min \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^G P_i \cdot g_{t,i} + \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^G PAP_i \cdot a_{t,i} + \sum_{t=1}^{24} CR_t \cdot r_t$$

Con las siguientes restricciones:

$$g_{i,t} - \max_{i,t} \cdot u_{i,t} \leq 0 \quad \forall i, \forall t$$

$$g_{i,t} - \min_{i,t} \cdot u_{i,t} \geq 0 \quad \forall i, \forall t$$

$$\sum_{i=1}^G g_{t,i} + r_t = Demanda_t \quad \forall t$$

$$a_{t,i} - p_{t,i} \geq u_{t,i} - u_{t-1,i} \quad \forall t, i$$

$$a_{t,i} + p_{t,i} \leq 1 \quad \forall t, i$$

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

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

$$\sum_{k=t-TML+1}^t a_{i,k} \leq u_{i,t} \quad \forall i, t \in [TML, 24]$$

$$\sum_{k=t-TMFL+1}^t p_{i,k} \leq 1 - u_{i,t} \quad \forall i, t \in [TMFL, 24]$$

El código respectivo de dicha programación estará adjunto al presente artículo.

## VI. RESULTADOS

De las centrales térmicas de interés mencionadas anteriormente, al realizar y ejecutar el código de optimización, solo fue despachada la central térmica TASAJERO 2. Dada esta situación en la TABLA V, se muestra los resultados de despacho para 2 diferentes condiciones. La primera de estas es con la regulación horaria actual, y la segunda de estas es con la regulación propuesta por el presente artículo, equivalente a periodos de 15 minutos.

Donde:

**D 15m:** Despacho con periodos de 15 minutos.

**D 1h:** Despacho horario.

TABLA V.  
COMPARACIÓN DESPACHO CON REGULACIÓN HORARIA Y REGULACIÓN CADA 15 MINUTOS PARA LA CENTRAL TÉRMICA TASAJERO 2.

Hora	D 15m	D 1h	Hora	D 15m	D 1h
24-1	0	0	12-13	170	170
	0			170	
	0			170	
	0			170	
1-2	0	0	13-14	170	170
	0			170	
	0			170	
	0			170	
2-3	0	0	14-15	170	170
	0			170	
	0			170	
	0			170	
3-4	0	0	15-16	170	170
	0			170	
	0			170	
	0			170	
4-5	0	0	16-17	170	170
	0			170	
	0			170	

	0			170	
5-6	0	0	17-18	170	170
	0			170	
	5.15			170	
	28.7			170	
6-7	52.3	75.8	18-19	170	170
	75.8			170	
	99.4			170	
	123			170	
7-8	146	170	19-20	170	170
	170			170	
	170			170	
	170			170	
8-9	170	170	20-21	170	170
	170			170	
	170			170	
	170			170	
9-10	170	170	21-22	170	170
	170			170	
	170			170	
	170			170	
10-11	170	170	22-23	170	170
	170			170	
	170			170	
	170			170	
11-12	170	170	23-24	170	170
	170			170	
	170			170	
	170			170	

## VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El proceso de optimización realizado a través de la formulación matemática especificada con anterioridad, arroja como resultado que solo la central térmica Tasajero2 saldría despachada, por consecuencia no se tuvo en cuenta la central Gecelca3 y Tcandell1 debido que, a la hora de realizar el despacho, con las condiciones iniciales de cada central, solo la planta de Tasajero2 entro en el despacho programado para el día 29 de octubre del 2020.

La TABLA V, nos muestra el despacho por periodos de 15 minutos y por hora de la central Tasajero2. Es el resultado del despacho después de utilizar un UR y DR de 94,2MW para periodo de una hora y UR y DR de 23,55MW para periodo de 15 minutos. En el despacho podemos observar que, en la sexta hora, la central empieza a entregar su oferta cuando se programó con UR de 15 minutos, iniciando en un valor de 5,15 MW y aumentando efectivamente en 23,55 MW cada 15 minutos, podemos

evidenciar que para el UR de una hora la maquina en este periodo aun no entra en funcionamiento; solo hasta la séptima hora empieza a entregar un valor de 75,8 MW mientras que el UR de 15 minutos sigue en aumento. Cabe resaltar que ambos UR llegan a su máximo en el octavo periodo donde ambos alcanzan el máximo que es de 170 MW y así terminan su generación por 24 horas debido a que su TML así lo indica.

Si bien la central entra en funcionamiento máximo en el mismo periodo tanto para UR de 15 minutos o de hora, es claro que tener un despacho de 15 minutos ayuda a tener un mayor control del despacho; en este momento donde las energías renovables están pasando a ser parte fundamental de la red energética del país, y conociendo que son energías con poca confiabilidad debido a su variabilidad; es casi obligatorio manejar un despacho de 15 minutos o menos para tener mucho más control de la oferta y demanda del mercado.

Además, se verifico con resultado satisfactorio que, en todo instante de tiempo, la demanda en cada uno de los 96 periodos que comprende el presente modelo, será satisfecha correctamente, garantizando en todo momento el equilibrio entre generación y demanda.

## VIII. CONCLUSIONES

Encontrar los nuevos parámetros de UR y DR, para el redespacho de recursos energéticos en periodos de 15min, ayuda a la optimización de recursos a un menor precio.

Plantear un despacho para un mayor número de periodos viabiliza la buena optimización de recursos energéticos a un menor costo y un redespacho más pertinente para centrales de generación donde su recurso para la generación de energía es variable como lo es en centrales eólicas y fotovoltaicas donde el suministro de viento o radiación puede ser variable en varias ocasiones en diferentes momentos en una hora.

Implementar más periodos de tiempo optimiza el costo de generación para toda la demanda energética del país.

## IX. REFERENCIAS

- [1] UPME, Boletín estadístico de minas y energía, “Generación energía eléctrica SIN 2018”, 2018.
- [2] R. Gallego, “Análisis de sistemas de potencia”, UTP. 1999.
- [3] L. Flórez, “Cálculo de la reserva rodante en el despacho económico”, 2008.
- [4] CREG, “Resolución CREG 024 de 1995”.

[5] “Despacho programado” [Online]:  
<http://www2.ing.puc.cl/~power/alumno97/pool/COLOMBIA.html>

[6] CREG, “Resolución 062 de 2000”.

[7] J. Lezama, “Propuesta alternativa para la inclusión de un criterio de igualación de riesgos en el cálculo del despacho de generación en el mercado”, 2006.

[8] J. Morales, “Modelo de despacho económico del sistema eléctrico colombiano”.