

Modelo de Despacho de Generación y de Número de Unidades Generadoras de Sistemas Hidroeléctricos de Generación

Dispatch model of generation and number of generating units in hydro generation systems

F. Fernandez¹, V. Zapata², F. Martí³, A. Arce⁴

¹ Universidad Católica “Nuestra señora de la Asunción” Campus de Alto Paraná, Paraguay. Email: fsfa92@gmail.com

² Universidad Católica “Nuestra señora de la Asunción” Campus de Alto Paraná, Paraguay. Email: vrze199410@gmail.com

³ Universidad Nacional del Este, Paraguay. Email: franmarti1894@hotmail.com

⁴ Universidad Nacional del Este, Paraguay. Email: arce@fpune.edu.py

⁴ Itaipu Binacional, Paraguay. Email: arce@itaipu.gov.py

RECIBIDO: abril 21, 2017. ACEPTADO: junio 02, 2017. VERSIÓN FINAL: noviembre 01, 2017

RESUMEN

El problema de despacho de generación de sistemas hidroeléctricos, es considerado como problema de grande porte, la función de producción hidroeléctrica está compuesta por variables no lineales, interrelacionadas, acopladas en el tiempo y muchas veces dependientes una de otra, cuando se trata de centrales localizadas en una misma cuenca hidrográfica.

La dinámica de estas variables en el tiempo es diferente una de la otra. El nivel del embalse muestra variaciones mínimas en el horizonte de corto plazo, diferentemente al nivel del canal de fuga que responde inmediatamente a las variaciones de la descarga.

El despacho de generación de los sistemas termoelectricos utiliza como criterio de desempeño el consumo de combustible y el costo asociado a este, diferente al caso de las hidroeléctricas que utilizan el agua para producir la energía eléctrica, al cual no se puede asignar directamente un valor de costo. Sin embargo, en un sistema de generación hidroeléctrico se debe buscar la eficiencia adoptando como criterio de desempeño para definir el despacho de generación el volumen de agua utilizada para la producción.

Este trabajo presenta un modelo de despacho de generación y de número de unidades generadoras de un sistema de generación hidroeléctrico, adoptando como criterio de desempeño el volumen del caudal turbinado. Para el efecto, la función de producción hidroeléctrica, a través de un proceso iterativo que lleva en cuenta la curva de rendimiento de la turbina, del generador, de las perdidas hidráulicas y las variaciones del canal de fuga, es substituida por una función que mide el caudal turbinado para cada unidad de potencia generada.

El problema es formulado como un problema clásico de despacho de generación termoelectrico con restricciones asociados a la capacidad de las unidades generadoras, de atendimento de la demanda y de meta de generación.

Como técnica de solución fue adoptado el clásico método dual del Lambda, e implementada en Matlab. Como estudio de caso aplicado a un sistema real muestra aumento en la eficiencia y buen desempeño computacional en términos de tiempo de procesamiento.

PALABRAS CLAVE: despacho, hidroeléctrica, potencia eléctrica, caudal.

ABSTRACT

The problem of dispatching generation of hydroelectric systems is considered as a large problem, the hydroelectric production function is composed of non-linear variables, interrelated, coupled in time and often dependent on one another, when dealing with localized power plants in the same river basin.

The dynamics of these variables over time is different from each other. The level of the reservoir shows minimum variations in the short term horizon, differently to the level of the leakage channel that responds immediately to the variations of the discharge.

The generation dispatch of the thermoelectric systems uses as a criterion of performance the fuel consumption and the associated cost to this one, different to the case of the hydroelectric ones that use the water to produce the

electrical energy, to which it is not possible to directly assign a value of cost. However, in a hydroelectric generation system, efficiency must be sought by adopting as a performance criterion to define the generation clearance the volume of water used for production.

This work presents a model of generation dispatch and number of generating units of a hydroelectric generation system, adopting as a performance criterion the volume of the turbine flow. For this purpose, the hydroelectric production function, through an iterative process that takes into account the performance curve of the turbine, the generator, the hydraulic losses and the variations of the leakage channel, is replaced by a function that measures The turbine flow rate for each unit of power generated.

The problem is formulated as a classic problem of thermoelectric generation dispatch with constraints associated with the capacity of the generating units, of meeting the demand and generation goal.

As a solution technique, the classic Lambda dual method was adopted and implemented in Matlab.

As case study applied to a real system shows increase in efficiency and good computational performance in terms of processing time.

KEYWORDS: dispatch, hydroelectric, water flow, electrical power.

1. INTRODUCCIÓN

El problema de despacho de generación y de unidades generadoras está dentro de los análisis del planeamiento y operación de corto plazo. En los sistemas hidrotérmicos de generación, con predominancia de la generación hidroeléctrica, el problema de despacho de generación y de unidades generadoras gana relevancia por la necesidad de adoptar un criterio de desempeño que permita definir la participación de cada una de estas fuentes de generación. En el caso de usinas termoeléctricas, el criterio de desempeño normalmente utilizado es el costo de producción, dado por el costo del combustible. En tanto, en usinas hidroeléctricas evaluar el costo de generación se hace más complicada en comparación al caso de usinas termoeléctricas, porque normalmente no existe un costo directo asociado al uso del agua, además la evaluación de la eficiencia en la generación hidroeléctrica requiere la representación de las diferentes variables que componen la generación hidroeléctrica y que finalmente resulte en una función de fácil aplicación [1]. Algunos trabajos proponen modelos con simplificaciones en la dinámica de las variables que componen la función de producción, tal como el nivel del canal de fuga obtenido con el promedio de la descarga diaria [2], o evaluar la eficiencia a través de la cuantificación de pérdidas en el sistema de generación, como la elevación del canal de fuga, pérdidas en el circuito hidráulico y variación del rendimiento del conjunto turbina-generator [3]. Este abordaje tiene la dificultad de cual referencia a ser adoptada para cuantificar las pérdidas relacionadas a la elevación del canal de fuga y la interrogante si la misma debería ser caracterizada como pérdida en el proceso de generación.

El criterio de desempeño adoptado en este trabajo para el despacho óptimo de generación y de unidades generadoras nos conduce a una metodología, la cual lleva en consideración las pérdidas hidráulicas en el

sistema de conducto forzado, la altura del canal de fuga y el rendimiento del conjunto turbina-generator. El efecto de cada una de estas variables son evaluadas a través de simulaciones de operación con diferentes valores de generación y configuración de unidades generadoras en las usinas, de modo a obtener una función que indique el volumen de caudal turbinado para cada valor de potencia generada y número de unidades generadoras en operación.

El despacho de generación y de unidades generadoras puede ser formulado como un problema para determinar, a lo largo del día, del número de unidades generadoras en operación, y la producción de cada una de ellas, con el fin de minimizar el volumen de agua utilizado, observando al mismo tiempo las restricciones de atendimento de la demanda y las metas diarias de generación de cada usina.

El trabajo está organizado de la siguiente manera, en la Sección II se presenta el criterio de desempeño adoptado, en la Sección III se presenta la formulación matemática y el método adoptado para obtener la solución del problema, en la Sección IV se presentan los resultados obtenidos por la aplicación del modelo en tres usinas hidroeléctricas y en la Sección V, se presentan las conclusiones.

2. CRITERIO DE DESEMPEÑO

La potencia generada por una unidad generadora hidroeléctrica puede ser representada por la siguiente ecuación:

$$p = g \times \rho \times n_g \times n_t \times h_l \times q \times 10^{-3} \quad (1)$$

Donde

p = potencia generada (MW),

g = aceleración de la gravedad ($\frac{m}{s^2}$),

ρ = peso específico del agua ($\frac{kg}{m^3}$),

n_g = rendimiento del generador (%),

n_t = rendimiento de la turbina (%),

$h_l = \text{altura del salto líquido}(m)$

$q = \text{caudal turbinado}(\frac{m^3}{s}),$

La altura del salto líquido está dada por:

$$h_l = h_e - h_{cf} - h_p \quad (2)$$

Donde,

$h_e = \text{altura del nivel del embalse}(m),$

$h_{cf} = \text{altura del canal de fuga}(m),$

$h_p = \text{pérdidas hidráulicas}(m),$

El rendimiento del generador n_g representa las pérdidas verificadas en el generador y normalmente es dada como una función de la potencia medida en los bornes del generador, es decir $n_g(P)$. Del mismo modo, n_t representa las pérdidas verificadas en la turbina y normalmente es dada como una función que depende de la altura del salto líquido y del caudal turbinado, es decir $n_t(h_l, q)$. Esta función por su forma es conocida como curva colina.

De la ecuación (2), la altura del embalse h_e es representada por un polinomio de cuarta orden en función al volumen de agua acumulada en el embalse (X), es decir $h_e(X)$. Así también el nivel del canal de fuga $h_{cf}(u)$ es representada como una función de la descarga (u), es decir de la suma del caudal turbinado (q) y eventuales vertimientos (v), es decir,

$$u = q + v \quad (3)$$

Una forma de representar la eficiencia de la generación hidroeléctrica es calculando el volumen de agua utilizado para producir una unidad de potencia. Conforme se puede verificar, la función que describe la potencia hidroeléctrica es no lineal y compuesta por variables interdependientes. En este trabajo se propone una metodología para evaluar el desempeño de la producción hidroeléctrica, determinando el volumen de agua necesario para producir una unidad de potencia considerando las diversas configuraciones de unidades generadoras en operación en cada central hidroeléctrica.

2.1. Nivel del embalse y del canal de fuga.

Los embalses poseen un papel importante en el planeamiento de largo y medio plazo. En el corto plazo, en el horizonte de un día y la observación horaria, se verifican que las variaciones son mínimas, que pueden ser desconsideradas llevando en cuenta las imprecisiones en variables como la previsión de afluencia, de la carga, las funciones cota versus volumen, cota versus canal de fuga, etc. Por otro lado, la respuesta del nivel de canal de fuga a las variaciones de la descarga es inmediata, y estas pueden variar significativamente a lo largo del día en función de las variaciones de la carga [4]. Por lo tanto en este trabajo, cuyo horizonte cubre el periodo de un día, considera el nivel del embalse constante, sin embargo, eventuales diferencias importantes entre el nivel del embalse previsto y verificado, las funciones de caudal turbinado

por cada unidad de potencia generada puede ser actualizada para los nuevos valores del nivel del embalse.

2.2. Algoritmo para el cálculo de la función Caudal Turbinado versus Potencia.

La función caudal turbinado versus potencia producida $Q(P)$ se obtiene a través de un proceso iterativo, en el cual se calcula para todas las configuraciones de unidades generadoras en operación, el caudal turbinado, cubriendo todo el rango de potencia permitida de las unidades generadoras, desde su límite inferior P_{min} hasta su límite superior P_{max} .

A seguir se describe los pasos del proceso iterativo.

Paso 1. Variar el número de unidades generadoras en operación, comenzando con $n_{maq}=1$, hasta alcanzar el número total de unidades generadoras de que cuenta la central hidroeléctrica.

Paso 2. Igualar el caudal turbinado (q^k) a la potencia de operación (p^o) multiplicado por el número de máquinas o unidades generadoras en operación (n_{maq}).

$$q^k = p^o \times n_{maq}$$

Paso 3. Calcular el valor de la altura del canal de fuga (h_{cf}) a través de la ecuación cota versus caudal, del tipo $h_{cf} = d + (c \times q^k) + [b \times (q^k)^2] + [a \times (q \times q^k)^3]$, donde a, b, c y d son los coeficientes de este polinomio.

Paso 4. Calcular el salto bruto $h_b = h_e - h_{cf}$, donde h_b es el salto bruto, h_e es el nivel del embalse y h_{cf} es el nivel del canal de fuga.

Paso 5. Calcular la altura del salto líquido $h_l = h_b - (h_b \times \text{pérdidas})$, donde *pérdidas* se refiere a las pérdidas hidráulicas y en este caso, es dada como un porcentaje del salto bruto.

Paso 6. Para cada par de valores de h_l y q^k , se obtiene de la curva colina el rendimiento de la turbina $\eta_T(q^k, h_l)$.

Paso 7. Calcular la potencia generada en MW

$$p = g \times \rho \times n_t \times n_g \times q^k \times h_l \times 10^{-3} \times n_{maq}$$

Paso 8. Comparar p con p^o y verificar si el error está dentro del rango de tolerancia deseada.

$$\text{error} = |p^o - p| \leq \text{tolerancia}$$

Si $\text{error} \leq \text{tolerancia}$, q^k es el caudal necesario para que la central opere con la potencia p^o . Ir al **Paso 10**. Caso contrario va al **Paso 9**.

Paso 9. Ajustar q

$q^{k+1} = q^k + (\text{error} \times \alpha)$, donde α es una constante de corrección de q . **Volver al Paso 3.**

Paso 10. Hacer $p^{o+1} = p^o + \Delta p$ y volver al **Paso 2**. Este proceso se repite hasta alcanzar el valor de p_{max} .

Paso 11. Hacer $n_{maq} = n_{maq} + 1$, hasta alcanzar el total de unidades generadoras disponibles en la central hidroeléctrica y volver al **Paso 2**.

La figura 1, muestra la curva $Q(p)$ para una central con 4 unidades generadoras. Muestra también una curva

envolvente inferior a las 4 curvas individuales, correspondiente a los diferentes numeros de unidades generadoras en operación. Con la curva envolvente se representa la funcion $Q(p)$ de la central hidroeléctrica. El despacho de generacion y de unidades generadoras, se define entonces como el problema de minimizar la suma a lo largo del horizonte de estudio, la suma de las funciones características $Q(p)$ de cada hidroeléctrica, observando las restricciones de capacidad máxima, mínima, de atendimento de la demanda y de meta de generación.

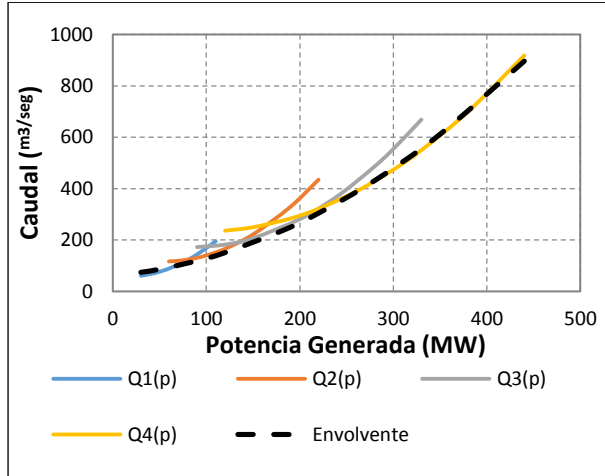


Figura 1 – Curva $Q(p)$ para una hidroeléctrica con 4 unidades generadoras.

3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y MÉTODO DE SOLUCIÓN.

Conforme descrito en la sección anterior el problema puede ser representado por la siguiente formulación matemática.

$$\text{Min} \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^N Q_{i,t}(p_{i,t}) \quad (4)$$

$$\sum_{t=1}^{24} p_{it} = m_i \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N p_{it} = d_t \quad \forall t = 1, \dots, 24 \quad (6)$$

$$\underline{p}_i \leq p_i \leq \bar{p}_i \quad (7)$$

Donde p_{it} es la generación de la usina i en la hora t , \underline{p}_i , \bar{p}_i son los límites de generación de la usina i , d_t es la demanda del sistema en la hora t , m_i es la meta de

generación diaria de la usina i ; $Q_i(p_{i,t})$ es la curva característica de la central i en función de la potencia $p_{i,t}$. La restricción (5) representa la meta diaria de generación para todas las usinas; la restricción (6) representa la demanda global a cada intervalo de tiempo; la ecuación (7) se refiere al límite de generación de cada usina.

El problema representado en las ecuaciones (4)-(7) es un problema no lineal, pudiendo ser de grande porte conforme aumenta el número de hidroeléctricas. Así mismo, en esta formulación no se lleva en cuenta el número de unidades generadoras en operación, cuyo despacho será tratado por inspección al final del proceso de optimización.

El Lagrangeano del problema, desconsiderando las restricciones de capacidad máxima y mínima es dado por:

$$L(\lambda, \mu, p) = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^M Q_{i,t}(p_{i,t}) + \sum_{t=1}^{24} \lambda_t \left(P_{load,t} - \sum_{i=1}^N p_{i,t} \right) + \sum_{i=1}^N \mu_i \left(P_{meta,i} - \sum_{t=1}^{24} p_{i,t} \right) \quad (8)$$

Aun cuando no son consideradas las restricciones de capacidad máxima y mínima, el problema cuenta con 24 variables (λ) asociadas a la restricción de atendimento de la demanda, N variables (μ) asociadas a la restricción de la meta de generación de las hidroeléctricas y $(24 \times N)$ variables referente a la potencia a ser generada por cada hidroeléctrica. Para resolver problemas de esta envergadura se requiere de algoritmos eficientes de optimización. Sin embargo, a los efectos de probar el modelo se propone como solución una metodología similar a la sugerida en [5]. En este sentido, si en una primera instancia se fija el valor de (μ) el problema a resolver es el despacho de generación para el periodo de 24, similar al problema de despacho termoeléctrico, que inclusive lleva en cuenta las restricciones de capacidad máxima y mínima. Así, las condiciones de optimalidad se obtienen derivando el Lagrangeano con relación a las variables de decisión P , y λ .

$$\frac{\partial L}{\partial P_i} = \frac{dQ(P_i)}{dP_i} - \lambda = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = P_{load,t} - \sum_{i=1}^N p_{i,t} = 0 \quad \text{para } t = 1, \dots, 24 \quad (10)$$

La solución a este problema se obtiene por el clásico método del Lambda, proceso iterativo por el cual para un

dado valor de λ , a través de la ecuación (9) se obtiene los diferentes valores de potencia p_i , de cada usina, ajustando si necesario dentro de los límites de su capacidad máxima y mínima, de modo a atender la restricción dada en la ecuación (7). El ajuste de (λ) se obtiene por el producto de una constante α por la ecuación (10) hasta alcanzar el valor que permita atender esta restricción.

Es casi improbable que en la primera instancia se cumpla también la restricción de atendimento de la meta de generación, dada en la ecuación (4). La corrección de (μ) se efectúa de modo similar al (λ) hasta alcanzar el valor de la meta de generación.

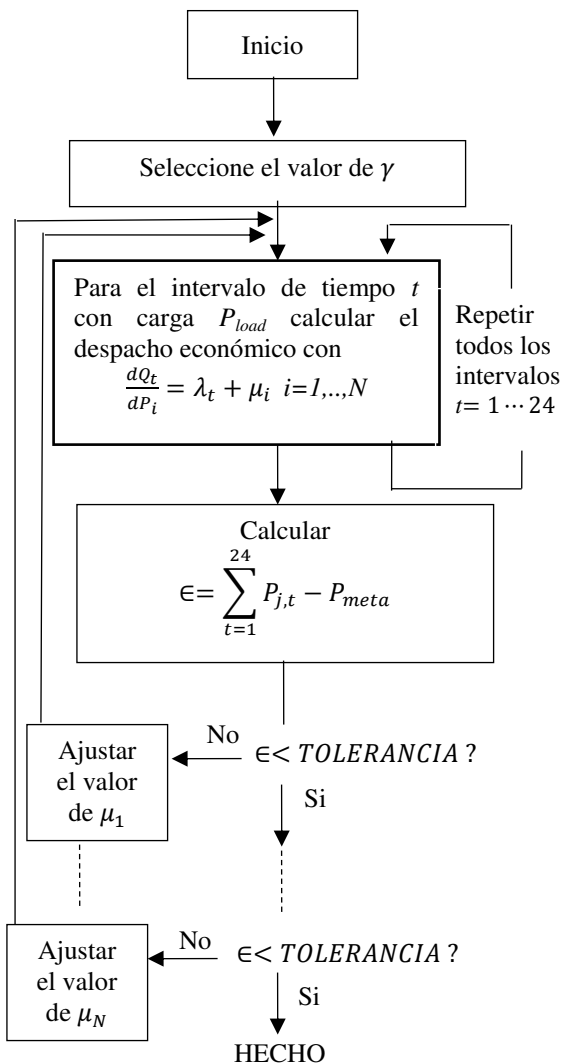


Figura 2 – Algoritmo de despacho óptimo de generación con restricción de meta de generación.

La figura 2, muestra el diagrama de bloque del algoritmo de solución para el despacho de generación con N centrales con restricción de meta de generación.

Queda evidente que la metodología propuesta es limitada a sistemas con pocas centrales hidroeléctricas.

4. ESTUDIO DE CASO

Como estudio de caso será considerado un sistema compuesta por tres centrales hidroeléctricas, cuyas características están en la tabla 1. Para fines de comparación será considerada como serie de demanda los datos de generación y de despacho de unidades generadoras verificadas el día 02/01/05. La suma de generación de las hidroeléctricas aquel día, fue establecida como metas de generación diaria de cada una de ellas, conforme consta en la tabla 2. El total de generación horaria de cada una de las centrales fue adoptada como demanda horaria del sistema, conforme consta en la tabla 3.

Tabla 1. Características de las usinas hidroeléctricas.

Usinas	Unidades Generadoras	Potencia Instalada (MW)
Salto Grande	4	77,76
Chavantes	4	408,8
Capivara	4	608,32

Tabla 2. Metas Energéticas

Usinas	Meta Energética (MWh)
Salto Grande	1680
Chavantes	5514
Capivara	11625

Tabla 3 Demanda Horaria

Hora	Demanda (MW)	Hora	Demanda (MW)
00	722	12	920
01	502	13	920
02	502	14	920
03	502	15	920
04	502	16	920
05	502	17	920
06	502	18	920
07	800	19	750
08	920	20	835
09	920	21	920
10	920	22	860
11	920	23	800

El algoritmo descrito fue desarrollado en Matlab, resultando en un buen desempeño, en términos de tiempo procesamiento. El programa corriendo en una PC con 2,5 GHZ y 4 Mb de memoria RAM, concluyó el procesamiento en 0,88 segundos.

Tabla 4. Resultados

Registro de volumen de agua utilizado (m ³)		Volumen de agua optimizado(m ³)
Salto Grande	46.231.214	46.447.025
Chavantes	31.648.882	28.263.780
Capivara	97.378.050	98.135.788
Total	175.258.146	172.846.594

5. RESULTADOS

La tabla 4, muestran los números relacionados al volumen de agua utilizado en la producción de las hidroeléctricas en el periodo de 24 horas, bien como el volumen de agua que sería utilizado si el despacho de generación fuese adoptado conforme al algoritmo de optimización. Se puede verificar una reducción del 1,38%, comparado al caso registrado.

Las curvas de la figura 3 muestran el despacho de generación verificada y la optimizada en las centrales hidroeléctricas de Salto Grande, Chavantes y Capivara, respectivamnete. Las tres centrales hidroeléctricas muestran una mudanza importante en terminos de regimende operación.

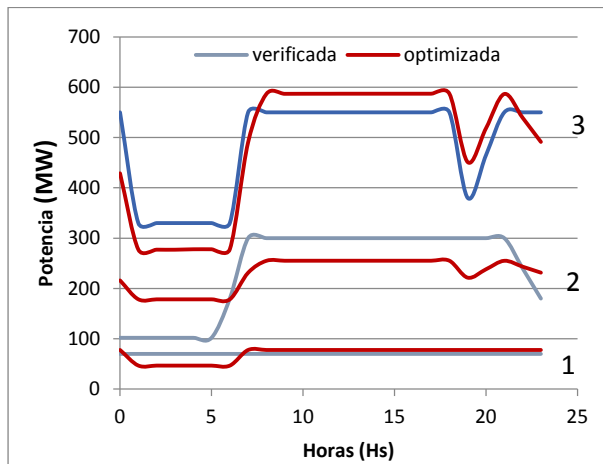


Figura 3- Despacho de generación verificada y optimizada de las hidroeléctricas. (1) Salto grande. (2) Chavantes. (3) Capivara.

Esta mudanza en el régimen de operación es más acentuada en la central de Salto Grande.

La figura 4 muestra el despacho de número de unidades generadoras en la central de Chavantes. El despacho

óptimo del número de unidades generadoras, se obtiene por inspección, a través del nivel de potencia óptima despachada en la usina obtenida con la curva envolvente. A cada valor de potencia, se tiene un número de unidades generadoras que resulta en el menor consumo de agua.

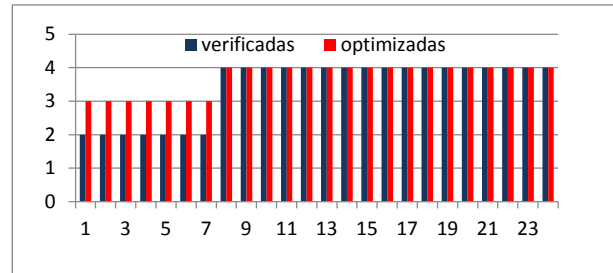


Figura 4 – Despacho de unidades generadoras verificadas y optimizadas en la Central de Chavantes.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo fue presentado un procedimiento para optimizar el despacho de generación y de unidades generadoras en usinas hidroeléctricas. Se propone un criterio de desempeño que lleva a consideración el consumo de agua por cada unidad de potencia. El modelo es presentado y resuelto como un problema clásico de despacho de centrales termoeléctricas con restricción de metas de generación. El modelo es aplicado en un sistema compuesto por tres centrales hidroeléctricas, resultando en reducción del consumo de agua, comparado con datos verificados, y el algoritmo con buen desempeño computacional.

7. REFERENCIAS

- [1] Li, C., Svoboda, A., Tseng, C., Johnson, R.; "Hydro Unit Commitment in Hydro-thermal Optimization", *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 12, n 2, pp. 764-769, 1997.
- [2] Da Silva, E., Finardi, E. C., Macedo, M. E.; "Comissionamento de Unidades Hidráulicas no Problema da Programação Energética", XVI SNPTEE, Campinas, S.P., Brasil, Outubro 2001.
- [3] Soares, S., Salmazo, C.; "Minimum Loss Predispach Model for Hydroelectric Power Systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, n° 3, pp. 1220-1228, August 1997.
- [4] S. Soares y L.S.A. Martins, "Insights on short-term hydropower scheduling: on the representation of water continuity equations", Power System Computation Conference (PSCC), 20-24 June 2016, Genoa, Italy.
- [5] Wood, A. J., Wollemberg, B. F., "Power Generation Operation & Control", John Wiley & Sons, 1984.