

UN NUEVO MODELO DE DESPACHO HIDROTÉRMICO EN AMBIENTES DE MERCADO USANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

RESUMEN

El despacho hidrotérmico es una herramienta clave en el planeamiento energético de los sistemas eléctricos. Normalmente éste es planteado para minimizar el costo de la generación térmica. En este artículo se presenta un nuevo modelo que tiene en cuenta las características de los mercados eléctricos actuales y la posibilidad de utilizar varios escenarios, el modelo es solucionado mediante la metodología de algoritmos genéticos.

PALABRAS CLAVES: Despacho hidrotérmico, mercado eléctrico, algoritmos genéticos, optimización combinatorial.

ABSTRACT

Hydrothermal coordination is a fundamental methodology to power systems energetic planning. Normally, this is formulated to minimize the thermal generation costs. This paper presents a novel model which considers the electrical market and uses multiple scenarios; this model is solved with genetic algorithms.

KEYWORDS: Hydrothermal coordination, electrical market, genetic algorithms.

1. INTRODUCCIÓN

El despacho hidrotérmico es una herramienta fundamental en el planeamiento operativo de los sistemas eléctricos. Tradicionalmente, este problema ha sido resuelto mediante modelos lineales estocásticos que no tienen en cuenta las realidades de los mercados actuales (Programación dinámica dual estocástica [1]).

El entorno competitivo de los mercados eléctricos hace necesario desarrollar una metodología que considere el problema en toda su complejidad. En este trabajo se propone un modelo de despacho hidrotérmico en escenarios de mercado y se utiliza la técnica de algoritmos genéticos para su solución.

Inicialmente se muestra el planteamiento general del problema y su importancia para la operación de los sistemas de potencia. Posteriormente, se presenta el modelo matemático tradicional y el modelo propuesto, seguidamente, se presenta la metodología de solución mediante el uso de la técnica de algoritmos genéticos adaptados al problema en particular. Finalmente, se muestran los resultados obtenidos.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El despacho hidrotérmico consiste en encontrar el plan de generación hidráulica y térmica del sistema de tal forma que se minimice el costo operativo a lo largo de un horizonte de tiempo a considerar [2].

La necesidad de optimización surge por las características del sistema de generación: la generación hidráulica tiene un costo operativo bajo aunque presenta

ALEJANDRO GARCÉS RUIZ

Ingeniero Electricista, MSc
Profesor Auxiliar
Programa de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
alejandrog@ohm.utp.edu.co

JUAN C. GALVIS MANSO

Ingeniero Electricista. MSc
Profesor Catedrático
Programa de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira.
juangalvis@ohm.utp.edu.co

RAMÓN GALLEGO RENDÓN

Ingeniero Electricista, PhD.
Profesor titular
Programa de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira.
ragr@utp.edu.co

una dependencia con la hidrología que plantea un riesgo de racionamiento asociado con las temporadas de sequía.

De otro lado, la generación térmica presenta un riesgo inferior pero a un costo operativo alto.

El problema presenta características dinámicas, es decir, una decisión operativa presente tiene influencia en el costo de la operación futura del sistema. La característica dinámica hace que el planeamiento de corto plazo requiera los resultados del mediano y este a su vez del largo plazo.

El problema presenta un carácter aleatorio de las afluencias que puede ser modelado de dos formas alternativas:

- Mediante una adecuada predicción: Usando redes neurodifusas.
- Mediante una separación en escenarios con un probabilidad determinada.

La segunda opción es manejada en este trabajo considerando de igual forma el mercado eléctrico en bolsa separado en escenarios probabilísticos.

La solución encontrada debe ser robusta de tal forma que intente cumplir con condiciones de operación y optimalidad para cualquier escenario.

El despacho hidrotérmico es realizado bajo el esquema de nodo único, es decir, no se considera las restricciones de la red de transmisión.

3. MODELO MATEMÁTICO

3.1 Modelo matemático usando programación lineal

El despacho hidrotérmico determinístico [3] puede ser modelado como un problema de programación lineal como se muestra a continuación:

$$\min \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_r} C_j \cdot GT_j^{(p)} \quad (1)$$

sa

$$\sum_{j=1}^{N_r} GT_j^{(p)} + \sum_{i=1}^{N_h} GH_i^{(p)} = D^{(p)} \quad (2)$$

$$GH_i^{(p)} = \rho_{(i)} \cdot Q_{(i)}^{(p)} \quad (3)$$

$$V_{(i)}^{(p)} = V_{(i)}^{(p-1)} + T \cdot (A_{(i)}^{(p)} - Q_{(i)}^{(p)} - S_{(i)}^{(p)}) \quad (4)$$

$$\left(V_{(i)}^{(p)} \right)_{\min} < V_{(i)}^{(p)} < \left(V_{(i)}^{(p)} \right)_{\max} \quad (5)$$

$$\left(Q_{(i)}^{(p)} \right)_{\min} < Q_{(i)}^{(p)} < \left(Q_{(i)}^{(p)} \right)_{\max} \quad (6)$$

$$\left(GT_{(j)}^{(p)} \right)_{\min} < GT_{(j)}^{(p)} < \left(GT_{(j)}^{(p)} \right)_{\max} \quad (7)$$

Donde

GH: generación hidráulica para la planta i en el periodo p .

GT: generación térmica para la planta j en periodo p .

V: volumen del embalse i en periodo p

Q: caudal turbinado en embalse i en periodo p

S: vertimientos asociados al embalse i en el periodo p

A: afluencias.

C: costo unitario de la generación térmica en la planta j .

ρ : factor de turbinamiento.

T: periodo considerado.

Este modelo puede ser resuelto usando una técnica de programación lineal como simplex o puntos interiores [4][5].

3.2 Modelo de mercado

Este esquema de despacho cumple con las siguientes reglas:

- Las plantas son despachadas por orden de mérito.
- El precio de bolsa corresponde al valor ofertado por la última planta no inflexible despachada.

En un mercado como el colombiano existe la figura de contratos, no obstante, dichos contratos tienen un carácter financiero y no físico, por tal razón dichos contratos no afectan el despacho ideal.

En el caso de un sistema hidrotérmico las primeras plantas en ser despachadas son las plantas hidráulicas, lo cual produce un valor mínimo en el costo presente de la

energía con el riesgo de ocasionar sobre-costos en el valor futuro. Es por ello que la cantidad de energía ofertada por parte de las plantas hidráulicas debe ser determinada. Así mismo el precio de bolsa lo determinan las térmicas por lo cual no es necesario predecir el precio de oferta de las plantas hidráulicas.

Cabe anotar, que el precio de bolsa y la potencia generada por cada térmica depende del precio de oferta de cada térmica y de la cantidad de energía ofertada por cada hidráulica.

El precio de oferta de cada planta térmica puede ser determinado de manera aproximada teniendo en cuenta los costos eficientes según la tecnología que utilice. La cantidad de generación ofertada corresponde al máximo de cada planta.

El despacho obtenido bajo un modelo de mercado tiene como variables básicas la cantidad de energía ofertada por parte de las plantas hidráulicas ya que la generación térmica y el precio de bolsa quedan automáticamente determinados una vez conocido el despacho ideal.

Esto reduce el número de variables a considerar pero requiere de la función de despacho ideal. Esta función determina la potencia de cada una de las plantas del sistema una vez conocidas las ofertas de generación de las plantas hidráulicas.

El modelo matemático es el siguiente:

$$\min \left\{ \text{Costo} = \sum_p \sum_k P_B^{(k,p)} \cdot D^{(k,p)} \cdot T(k) \right\} \quad (8)$$

sa

$$\left[P_B^{(k,p)}, GH_{(i)}^{(k,p)}, GT_{(j)}^{(k,p)} \right] = \text{DespachoIdeal}(GTO_{(j)}^{(k,p)}, GHO_{(i)}^{(k,p)}, CO_{(j)}^{(k,p)}) \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^{N_r} GT_{(j)}^{(k,p)} + \sum_{i=1}^{N_h} GH_{(i)}^{(k,p)} = D^{(k,p)} \quad (10)$$

$$GH_{(i)}^{(p)} = \rho_{(i)} \cdot Q_{(i)}^{(p)} \quad (11)$$

$$V_{(i)}^{(p)} = V_{(i)}^{(p-1)} + \sum_k T(k) \cdot \left(A_{(i)}^{(p)} - (Q_{(i)}^{(k,p)} + S_{(i)}^{(k,p)}) \right) \quad (12)$$

$$\left(V_{(i)}^{(p)} \right)_{\min} < V_{(i)}^{(p)} < \left(V_{(i)}^{(p)} \right)_{\max} \quad (13)$$

$$\left(Q_{(i)}^{(k,p)} \right)_{\min} < Q_{(i)}^{(k,p)} < \left(Q_{(i)}^{(k,p)} \right)_{\max} \quad (14)$$

$$\left(GT_{(j)}^{(k,p)} \right)_{\min} < GT_{(j)}^{(k,p)} < \left(GT_{(j)}^{(k,p)} \right)_{\max} \quad (15)$$

Donde

$P_B^{(k,p)}$: precio de bolsa en el periodo p para la condición de demanda k .

$D^{(p,k)}$: demanda en el periodo p para el estado k .

k : Posibles estados de generación (*máxima, media, mínima*).

$T(k)$: Duración de la demanda para el estado k .

GTO : Generación térmica ofertada.

GHO: Generación hidráulica ofertada.

CO: Precios de oferta de cada planta.

Este modelo tiene en cuenta la curva de duración de carga por medio del parámetro $T(k)$ por lo cual la restricción de volumen es distinta al modelo lineal.

Los valores de generación hidráulica y térmica así como el precio de bolsa quedan determinados por la función despacho ideal que debe ser evaluada para cada valor de (p,k) por tal motivo las variables de decisión son exclusivamente el vector *GHO* pues los valores de *GTO* y *CO* son conocidos.

La generación ofertada (*GHO*) por cada planta hidráulica puede ser representada como un porcentaje de la generación disponible (volumen disponible) para un periodo determinado, de esta forma las variables de decisión tomaran valores de 0 a 100 en intervalos discretos definidos a priori, no se asume una discretización directa en los caudales, en la generación o en los volúmenes.

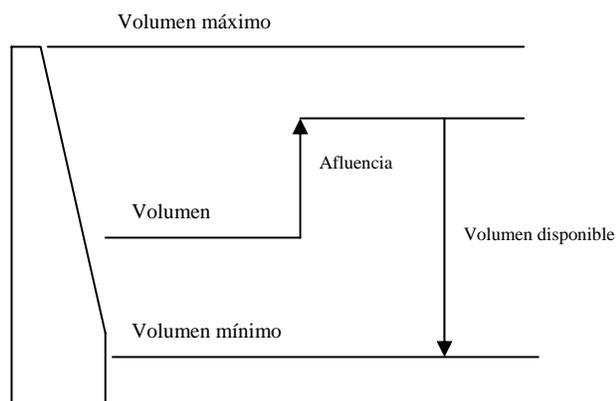


Figura 1. Datos de cada embalse

Así mismo, la infactibilidad hidráulica es resuelta pues en los casos en que el caudal disponible sea cero la generación ofertada será igual a cero, esto implica un aumento en el costo presente con lo cual se verá como una solución poco atractiva para el método.

La infactibilidad térmica es modelada por una planta térmica ficticia de capacidad igual a la demanda máxima cuyo precio de oferta es superior al de la térmica más costosa, para efectos prácticos se puede asumir como el costo de racionamiento.

Uso de escenarios

Puesto que las afluencias tienen un carácter aleatorio, el problema de despacho debe ser modificado para considerar varios escenarios [6]. En este caso la solución debe ser lo suficientemente robusta para cumplir con cualquiera de los escenarios propuestos.

Este hecho implica sacrificar la optimalidad ya que una solución robusta es de peor calidad que cualquiera de las soluciones encontradas usando un solo escenario. Es por ello aconsejable tener pocos escenarios y las probabilidades asociadas a cada uno.

Si se tiene un escenario con probabilidad alta es posible encontrar mejores soluciones optimizando dicho escenario y considerando los demás dentro de las restricciones. Este hecho se modela matemáticamente así:

$$\min \sum_{h=1}^{Nh} P(h) \cdot Costo(h) \tag{16}$$

sa

$$CR(h). \tag{17}$$

en donde:

h : cada uno de los escenarios considerados.

$P(h)$: probabilidad de ocurrencia del escenario h .

$Costo(h)$: costo del escenario h encontrado con el modelo de mercado.

$CR(h)$: conjunto de restricciones para el escenario h de acuerdo al modelo de mercado.

La codificación mostrada en la sección anterior permite que una sola solución corresponda a un conjunto de generación y precios de bolsa distintos dependiendo del escenario. Es decir, se plantea una política operativa y no una solución directa de volúmenes o caudales.

4. EL ALGORITMO GENÉTICO

4.1 Características

Los algoritmos genéticos fueron concebidos para solucionar problemas de optimización de características no polinomiales [7]. Su aplicación esta basada en la emulación de las leyes básicas de la genética aplicando tres operadores sobre una población:

- Selección.
- Recombinación.
- Mutación.

Cada uno de estos operadores tiene variadas versiones y pueden ser modificados de acuerdo al problema. Así mismo, la inicialización de la población puede ser adaptada al problema particular para mejorar el rendimiento del método.

A continuación se muestran cada una de estos operadores.

4.2 Selección

La selección permite encontrar los individuos que tienen derecho a reproducir sus características en la nueva población. Para determinar cuales individuos están “mejor adaptados” se utiliza la función objetivo o una función análoga denominada función fitness.

La metodología de selección más utilizada es la regla de la ruleta: los diferentes individuos de la población son elegidos de forma aleatoria teniendo en cuenta una probabilidad asociada proporcional a su función fitness. Esta función esta definida para problemas de

maximización pues las soluciones de mayor valor tendrán una probabilidad igualmente mayor de ser elegidas.

En el caso del problema de despacho hidrotérmico, la función objetivo debe ser minimizada por lo cual se establece una función fitness que se mostrará mas adelante.

Adicionalmente, se requiere que exista una diferenciación entre las soluciones para garantizar la eficiencia del método, esta diferenciación es llamada selectividad.

4.3 Recombinación

La recombinación consiste en establecer una regla para intercambiar información entre dos individuos que tienen derecho a descendencia.

Existen variadas formas de recombinación, una de las mas conocidas es la de un punto: se define un punto de cruzamiento (cross over) de manera aleatoria, éste punto indica la cantidad de información que un individuo enviará al nuevo individuo.

En este caso los dos nuevos individuos contienen información de los dos elementos seleccionados de tal forma que se aumenta la posibilidad de encontrar el óptimo de generación en generación.

4.4 Mutación

La mutación añade diversidad al método, esta consiste en cambiar el valor de uno de los elementos del vector de decisión, para este caso se estableció una probabilidad de mutación de 5 %. El procedimiento seguido es el siguiente:

Lanzar un número aleatorio entre 0 y 1

Si el número es mayor a 0.05 no hacer ningún cambio

Si el número es menor a 0.05 escoger aleatoriamente un individuo de la población.

Escoger una de las posiciones del individuo seleccionado y ubicar un número aleatorio entre 0 y 100 (teniendo en cuenta la discretización escogida).

5. ALGORITMO GENÉTICO ADAPTADO AL PROBLEMA DE DESPACHO

5.1 Codificación

Las variables de decisión del problema con mercado consisten en un porcentaje de la generación disponible. Este porcentaje es convertido a unidades de potencia de acuerdo con las afluencias y con el volumen inicial del embalse en cada periodo. La potencia encontrada de esta forma corresponde a la oferta de las plantas hidráulicas con lo cual queda determinada la potencia de las plantas térmicas y el precio de bolsa usando el despacho ideal.

Algunas plantas entran en operación en periodos distintos, por tal motivo las variables de decisión pueden ser reducidas a los valores en los cuales cada planta funciona ya que los puntos en los cuales la planta no opera quedan inhabilitados por parte del despacho ideal. Es decir, Como cada planta entra en funcionamiento en

años distintos algunas posiciones de la matriz tienen valor cero. En esta representación cada fila corresponde a una planta hidráulica mientras las columnas corresponden a un punto de operación (periodo y condición de demanda). En este caso las posiciones con valor cero son los puntos en los cuales la planta hidráulica no ha entrado en operación, por tal razón cualquier valor que tomen estas posiciones no intervendrán en la solución real y pueden ser descartadas. Así mismo la última columna tiene un valor de 100% lo cual significa que el embalse puede ser evacuado hasta su volumen mínimo, por ello estos valores tienen también un valor fijo. Cada individuo se inicializa de forma aleatoria para garantizar diversidad desde el primer momento.

5.3 Función Fitness

Para poder utilizar la ruleta como operador de selección se requiere llevar la función de minimización a una función de maximización. Igualmente, en el problema de mercado existe una pérdida de selectividad inherente al despacho ideal: el precio de bolsa corresponde al valor ofertado por parte de la última planta no inflexible despachada, por tal razón, si la última planta despachada oferta a \$ 50 con una potencia máxima de 400 MW, el precio de bolsa será de \$50 así dicha planta sea despachada con cualquier valor entre 1MW y 400MW.

En conclusión, el precio de bolsa no presenta una selectividad adecuada para ser implementado en un algoritmo combinatorial como el genético y se requiere de una función fitness que presente las siguientes características:

Al maximizar la función fitness se minimiza el precio de bolsa.

Debe tener selectividad considerando no solo la reducción del costo de la operación sino también el riesgo de racionamiento.

En el caso del despacho ideal se puede observar que existe una relación monótonamente creciente entre el precio de bolsa y la generación térmica ofertada como se muestra en la figura 2:

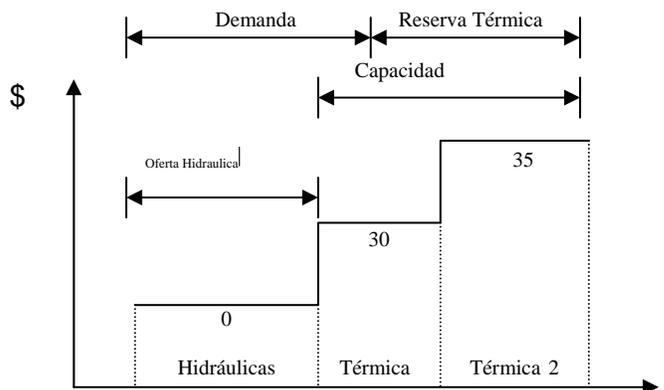


Figura 2. Variables del sistema de generación.

De igual forma, Se puede observar que existe una relación directa entre el precio de bolsa y la cantidad de generación térmica utilizada y el costo de la misma.

Puesto que la capacidad térmica del sistema es constante entonces minimizar el valor de la bolsa equivale a maximizar la reserva térmica, por lo cual la función fitness tiene la siguiente forma:

$$\max ff = \sum_{h=1}^{Escenarios} \sum_p \sum_k^3 D(p, k, h) \cdot R_T(p, k, h) \cdot T(k) \quad (18)$$

Esta función además de tener mayor selectividad encuentra soluciones de bajo costo y mayor seguridad pues maximiza la cantidad de generación térmica libre por lo cual se minimiza el riesgo de racionamiento.

6. EJEMPLO DE PRUEBA

6.1 Datos del Sistema

El sistema es despachado bajo el esquema de nodo único sin considerar las pérdidas ni las restricciones de la red. El sistema consta de dos centrales térmicas y tres centrales hidráulicas. Las centrales hidráulicas entran en operación de forma progresiva en cada uno de los tres años considerados de tal forma que en el primer año opera solo la central CH6A, en el segundo opera además de esta, la central GH6B y en el tercer año operan las tres centrales. Se tienen cuatro escenarios hidrológicos con igual probabilidad de ocurrencia:

SERIE	RÍO	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3
1	RÍO 6	228	685	57
	RÍO 6_A	342	228	57
	RÍO 6_B	-	57	57
2	RÍO 6	685	91	228
	RÍO 6_A	228	57	194
	RÍO 6_B	-	57	171
3	RÍO 6	228	228	685
	RÍO 6_A	57	34	57
	RÍO 6_B	-	137	228
4	RÍO 6	742	171	228
	RÍO 6_A	228	171	114
	RÍO 6_B	-	171	114

Tabla 1. Series hidrológicas utilizadas.

Los datos de demanda son los siguientes:

Situación de Demanda	Año 1	Año 2	Año 3	Duración (h)
Máxima	1107	1373	1560	2190
Media	830	1030	1110	4030
Mínima	553	687	780	2540

Tabla 2. Demanda del sistema

Las plantas tienen las siguientes características:

Nodo	Unidad	Tipo	MW	MVAR	Precio
1	GT1	Térmica	400	300	30
3	GT3	Térmica	700	550	35
6	GH6A	Hidráulica	600	450	0
6	GH6B	Hidráulica	300	250	0
6	GH6C	Hidráulica	300	250	0

Tabla 3. Características de las centrales

Adicionalmente, existen restricciones de capacidad de los embalses y turbinamiento:

Unidad	Vmax [hm³]	Vmin [hm³]	Vinicial [hm³]	Vfinal [hm³]	Turbinamiento Máximo [m³/s]	Factor de producción
GH6A	35000	0	10000	20000	600	1
GH6B	15000	0	---	0	300	1
GH6C	15000	0	---	0	300	1

Tabla 4. Características de los embalses.

6.3 Solución en varios escenarios.

El problema en varios escenarios tiene en cuenta las series hidrológicas y la probabilidad de ocurrencia de cada uno. En este caso cada escenario tiene igual probabilidad de ocurrir. Los resultados se muestran a continuación.

Porcentajes del caudal disponible									
Demanda:	Mínima			Media			Máxima		
Año Planta	1	2	3	1	2	3	1	2	3
GH6A	50	0	100	0	0	50	25	25	25
GH6B	0	0	100	0	25	25	0	25	100
GH6C	0	0	100	0	0	50	0	0	0

Este resultado puede ser desagregado en los cuatro escenarios:

Escenario 1									
Demanda:	Mínima			Media			Máxima		
Año Planta	1	2	3	1	2	3	1	2	3
GH6A	553	0	300	0	0	189	545	444	231
GH6B		0	300		269	191		300	300
GH6C			180			124			0
GT1	0	400	0	400	400	400	400	400	400
GT3	0	287	0	430	361	205	162	229	628
Bolsa	0	35	0	35	35	35	35	35	35

Costo de la operación: 830.7

Escenario 2									
Demanda:	Mínima			Media			Máxima		
Año Planta	1	2	3	1	2	3	1	2	3
GH6A	553	0	374	0	0	236	600	293	289
GH6B		0	300		114	150		300	300

GH6C			105			249			0
GT1	0	400	0	400	400	400	400	400	400
GT3	0	287	0	430	516	76	107	379	570
Bolsa	0	35	0	35	35	35	35	35	35

Costo de la operación: 830.7

Escenario 3									
Demanda:	Mínima			Media			Máxima		
Año Planta	1	2	3	1	2	3	1	2	3
GH6A	553	0	600	0	0	418	545	0	513
GH6B		0	143		12	30		273	74
GH6C			36			300			0
GT1	0	400	0	400	400	361	400	400	400
GT3	0	287	0	430	617	0	162	700	572
Bolsa	0	35	0	35	35	30	35	35	35

Costo de la operación: 808.36

Escenario 4									
Demanda:	Mínima			Media			Máxima		
Año Planta	1	2	3	1	2	3	1	2	3
GH6A	553	0	507	0	0	320	600	430	392
GH6B		0	272		176	153	0	300	300
GH6C			0			300			0
GT1	0	400	0	400	400	337	400	400	400
GT3	0	287	0	430	453	0	107	242	467
Bolsa	0	35	0	35	35	30	35	35	35

Costo de la operación: 808.36

En todos los casos el método intentó minimizar el precio de bolsa durante los periodos de demanda máxima, esto se debe a las características del problema:

En los periodos de demanda máxima el precio de bolsa es siempre 35 ya que las plantas hidráulicas son incapaces de aportar la generación suficiente para influir en el precio de bolsa de estos periodos, en este caso el generador térmico GT3 puede ser despachado desde un valor bajo hasta su capacidad máxima sin afectar el precio de bolsa.

En los periodos de demanda mínima y media el sistema hidráulico tiene mayor capacidad de maniobra, es por esto que los resultados en estos periodos son inferiores. Así mismo, la duración de estas dos condiciones de demanda es mayor a la duración de la demanda máxima.

El costo operativo es mas alto que el obtenido con un solo escenario este es un sacrificio aceptable al ser una solución robusta y más exacta pues tiene en cuenta la curva de duración de carga discretizada en tres partes.

El nuevo modelo tiene en cuenta la forma real en que son despachadas cada una de las centrales en el sistema por lo cual sus resultados se acercan más a la realidad del mismo.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos al grupo de investigación en planeamiento de sistemas eléctricos de

la Universidad Tecnológica de Pereira por su apoyo constante.

8. CONCLUSIONES

Se presenta un nuevo enfoque al problema de despacho hidrotérmico que tiene en cuenta las características del mercado eléctrico en donde se minimiza el precio de bolsa a diferencia del enfoque convencional en donde se minimiza el costo de la generación térmica.

El uso de escenarios aumenta el costo de operación del sistema pero produce soluciones más robustas y confiables que tienen en cuenta los efectos del mercado.

Una función objetivo de maximización de la reserva térmica es equivalente a minimizar el costo de la energía en un mercado basado en bolsa.

9. BIBLIOGRAFÍA

[1] Pereira Mario Veiga, et all. "Operação descentralizada de sistemas hidrotérmicos em ambiente de mercado". Seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica". (15º:2001 São paulo Brazil) 2001.

[2] Galvis manso Juan Carlos, Garcés Ruiz Alejandro, Escobar Antonio. "Aplicación del algoritmo de búsqueda tabú al problema de despacho hidrotérmico". Revista scientia et technica Año XI N° 29. Dic 2005.

[3] Camac Gutierrez, D. "Programación dinámica dual determinística en el despacho hidrotérmico". Tesis de maestria. Pontificia Universidad Católica de Chile. Escuela de ingeniería. 1994

[4] Soares secundino. "Seminario planeamiento y programación de la operación de sistemas de energía eléctrica". Universidad Tecnológica de Pereira. Julio 2004.

[5] _____, Martinez Luciana. "A primal and dual stochastic dynamic programming in long term hydrothermal scheduling". Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES. Oct 2004.

[6] Vargas Luis. et all. "A scenario simulation approach for market power analysis in hydrothermal systems". IEEE. Trans. Power systems. Vol 18 N° 3. Aug 2003.

[7] Christoforos et all. "A genetic algorithm solution approach to the hydrothermal coordination problem". IEEE Trans. Power Systems. Vol 19. N° 2. May 2004.

[8] Ventosa M, et all; "An MCP approach for hydrothermal coordination in deregulated power markets" IEEE power engineering society summer meeting 2000. Vol 4 Jul 2000.