

ALGORITMO EVOLUTIVO DIFERENCIAL APLICADO AL PROBLEMA DE DESPACHO HIDROTÉRMICO

RESUMEN

En este artículo se presenta un nuevo modelo de despacho hidrotérmico determinístico el cual tiene en cuenta las restricciones de la red y la característica cuadrática de los costos en las plantas térmicas. La metodología de solución propuesta utiliza una combinación de algoritmos evolutivos diferenciales y programación cuadrática permitiendo un posterior análisis de sensibilidad. El modelo es evaluado por medio de un sistema de prueba.

PALABRAS CLAVES: Despacho hidrotérmico, algoritmos evolutivos, planeamiento de la operación, programación cuadrática, algoritmos genéticos.

ABSTRACT

This paper presents a new hydrothermal deterministic dispatch model which considers the net restrictions and quadratic cost characteristic functions. The propose methodology uses evolutionary differential algorithms and quadratic programming, later a sensibility analysis is realized. The model is evaluated in a test system

KEYWORDS: Hydrothermal dispatch, evolutionary algorithms, operation planning, quadratic programming, genetic algorithms.

1. INTRODUCCIÓN

El uso eficiente de los recursos energéticos constituye uno de los problemas de optimización más importantes en la operación de los sistemas de generación, especialmente en el caso de los sistemas hidrotérmicos.

El despacho hidrotérmico realiza el planeamiento de la operación de los sistemas hidrotérmicos a través de la distribución adecuada entre la generación hidráulica y la generación térmica de tal forma que el costo operativo sea óptimo durante el periodo de estudio. La característica dinámica de las centrales hidroeléctricas hace de este problema uno de los más complejos desde el punto de vista computacional. Tradicionalmente, este problema es solucionado mediante varios métodos tales como la programación dinámica [1], la programación dinámica dual [2] y los algoritmos genéticos [3] entre otros.

En la mayoría de los casos el problema es simplificado para permitir una solución en un tiempo computacional razonable. Las simplificaciones más usuales son linealizar las funciones de costo de las plantas térmicas y eliminar las restricciones de la red de tal forma que el despacho se realice a nodo único.

En este artículo se presenta la aplicación de los algoritmos evolutivos al problema de despacho hidrotérmico; el modelo propuesto considera las restricciones de la red así como las curvas de costo de las plantas térmicas. Inicialmente se expone el modelo matemático propuesto y sus principales diferencias con respecto a los modelos tradicionales, seguidamente se

ALEJANDRO GARCÉS RUIZ

Profesor auxiliar
Universidad Tecnológica de Pereira
alejandrog@ohm.utp.edu.co

JUAN CARLOS GALVIS

Magíster en Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
juancgalvis@gmail.com

OSCAR GÓMEZ CARMONA

Profesor auxiliar
Universidad Tecnológica de Pereira.
jr@utp.edu.co

exponen algunos aspectos relacionados con la programación cuadrática y asociados al problema que se resuelve en este trabajo, junto con los algoritmos evolutivos como técnica de solución, finalmente se muestra la implementación del método y los resultados obtenidos a través de un sistema de prueba.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Definición del problema

El despacho hidrotérmico asigna a cada una de las centrales del sistema, la generación óptima en cada periodo de tiempo; el objetivo es hacer mínimo el costo operativo total a lo largo del horizonte de planeamiento. La principal dificultad de este problema radica en el acople temporal de las centrales de generación hidráulica; una decisión operativa presente afecta la operación futura del sistema en la medida que aumente o disminuya el volumen de los embalses como se muestra en la figura 1. La dependencia con la hidrología hace que el problema sea estocástico, no obstante, es posible encontrar una buena predicción de las afluencias (a mediano plazo), mediante el uso de técnicas inteligentes, como las redes neuronales [4], las redes neurodifusas, y las técnicas de simulación estadística. De esta forma el problema es determinístico cuando se realiza una predicción de caudales previa; la cual determina los escenarios de afluencia con mayor probabilidad de ocurrencia. En este trabajo se asume que esta etapa ya ha sido realizada y se

presenta solo la solución del problema de despacho hidrotérmico.

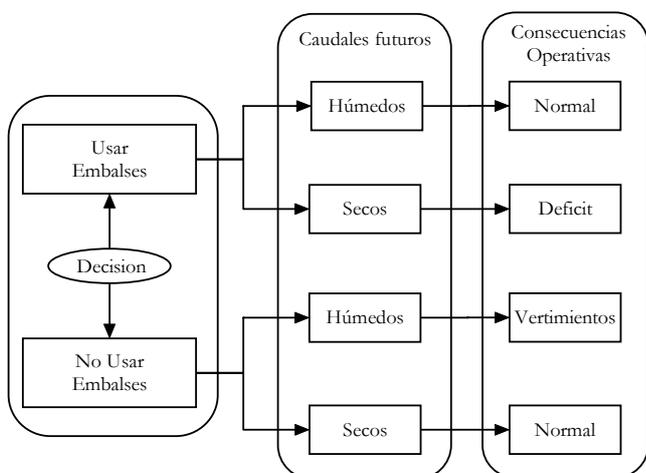


Figura 1. Dependencia temporal de la operación de los embalses.

2.2. Modelo Matemático

El modelo matemático para el despacho hidrotérmico es:

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{NT} C(P_{(k,t)})$$

sa

$$C(P_{(k,t)}) = \frac{a_k}{2} \cdot P_{(k,t)}^2 + b_k \cdot P_{(k,t)}$$

$$V_{(i,t)} = V_{(i,t-1)} + \tau \cdot A_{(i,t)} - \tau \cdot Q_{(i,t)} - \tau \cdot S_{(i,t)}$$

$$P_{(i,t)} = \rho \cdot Q_{(i,t)}$$

$$F_{(km,t)} = \frac{\theta_{(k,t)} - \theta_{(m,t)}}{X_{(km)}} \tag{1}$$

$$P_{(k,t)} - D_{(k,t)} = \sum_{m=1}^L F_{(km,t)}$$

$$P_{k \min} < P_{(k,t)} < P_{k \max}$$

$$F_{km \min} < F_{(km,t)} < F_{km \max}$$

$$Q_{i \min} < Q_{(i,t)} < Q_{i \max}$$

$$V_{i \min} < V_{(i,t)} < V_{i \max}$$

donde:

- k :** Enumera las centrales del sistema.
- i :** Enumera las centrales hidráulicas del sistema.
- t :** Enumera cada uno de los periodos considerados.
- C :** Función de costo de cada una de las plantas del sistema.
- a_k, b_k :** Coeficientes de las funciones cuadráticas de costo de cada una de las centrales del sistema

(en el caso de las centrales hidráulicas su valor es cero).

- V_(i,t) :** Volumen de la central i al final del periodo t.
- P_(k,t) :** Potencia generada por la planta k en el periodo t.
- F_(mk,t) :** Flujo de potencia activa entre los nodos k y m en el periodo t.
- Q_(i,t) :** Caudal turbinado.
- ρ :** Coeficiente de que relaciona el caudal turbinado con la potencia generada en cada embalse.
- τ :** Factor de conversión entre caudal y volumen.
- X_{km} :** Reactancia de la línea entre los nodos k y m.

Las funciones de costo pueden ser cuadráticas o lineales, en este modelo se considera un conjunto de funciones cuadráticas, conformando así un problema de programación no lineal cuadrático. También se puede plantear un modelo basado en bolsa modificando estas funciones en un esquema de orden de méritos.

En el caso de las centrales hidráulicas el valor de **a_k** y **b_k** es cero; **k** enumera todas las centrales mientras que **i** solo corresponde a las centrales hidráulicas.

3. TÉCNICA DE SOLUCIÓN

3.1 Programación cuadrática

La programación cuadrática es una técnica de solución en la cual la función objetivo toma una forma cuadrática mientras que las restricciones generan un espacio convexo. La función objetivo es, por lo tanto, una función convexa.

Este tipo de problema, también conocido como de programación convexa, tiene la siguiente característica fundamental: si **X**, es una solución óptima local, entonces **X**, es también una solución óptima global [5].

Existen diferentes algoritmos para resolver problemas no lineales con restricciones, muchos de ellos son resueltos a través de una serie de problemas de optimización irrestrictos, además las funciones cuadráticas tienen características especiales que son aprovechadas en los algoritmos de solución. En este trabajo es utilizada la técnica de la referencia [6].

3.2 Algoritmos evolutivos

La complejidad matemática de algunos problemas clásicos en la investigación de operaciones, ha llevado al uso de técnicas heurísticas con la intención de encontrar soluciones de buena calidad pese a no garantizar una solución óptima global, hecho que ni siquiera puede ser garantizado por técnicas matemáticas exactas, salvo bajo algunas suposiciones de convexidad. Estas metodologías permiten una exploración inteligente en el espacio de

soluciones encontrando incumbentes de alta calidad en un tiempo computacional razonable.

Entre las metodologías más exitosas en el campo de la optimización se encuentran los algoritmos genéticos y en un plano más general, los algoritmos evolutivos; éstos parten de las leyes básicas de la evolución (selección, recombinación, mutación, etc) de modo que se optimice una función objetivo.

Los algoritmos evolutivos [7] son inicializados con un conjunto de soluciones normalmente factibles generadas aleatoriamente, estas soluciones son evaluadas en la función objetivo para determinar su optimalidad.

El conjunto de soluciones, denominado población, es sometido a un proceso de selección en donde las soluciones o individuos de mejor desempeño en la función objetivo tienen mayor probabilidad de reproducir sus características en la siguiente generación (iteración).

El proceso de recombinación consiste en mezclar dos o más soluciones elegidas aleatoriamente pero dando prelación a las soluciones más óptimas; de esta forma se genera un nuevo conjunto de individuos en los cuales se evaluará la función objetivo.

El algoritmo debe contar con una adecuada relación entre elitismo, definido como la priorización de las soluciones de alta calidad, y la diversidad, definida como la distancia entre una solución y otra para recorrer un espacio de soluciones más amplio y evitar los óptimos locales.

Puesto que cada población reproduce los datos de poblaciones anteriores, el algoritmo requiere elementos que den diversidad, para ello se utiliza el concepto de mutación el cual modifica elementos de la población de forma aleatoria para introducir características que no estaban presentes en la misma y que de otra forma no podrían ser explorados.

5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

5.1 Separación del problema

El modelo propuesto es separado en dos subproblemas (A y B) acoplados: el subproblema A se encarga de despachar las plantas hidráulicas teniendo en cuenta el acople temporal mientras que el B se encarga de las plantas térmicas en un proceso de despacho independiente para cada periodo. En la figura 2 se muestra el esquema propuesto.

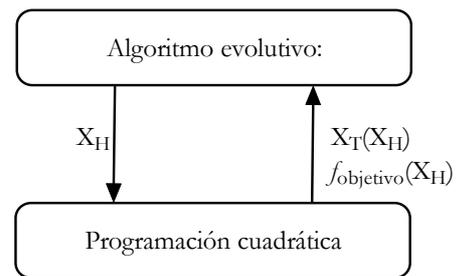


Figura 2. Separación de las variables del problema.

Las variables de decisión son igualmente separables; sea $X=(X_H, X_T, X_S)$ las variables independientes del problema; X_H corresponde a la decisión operativa de las plantas hidráulicas (cuanto generar) mientras que X_T corresponde a las decisiones operativas de las plantas térmicas y X_S corresponden a las variables asociadas al sistema (flujos de carga, ángulos nodales, etc).

El subproblema A encuentra las variables X_H por medio de un algoritmo evolutivo, no obstante para encontrar el valor de la función objetivo se requiere dar solución al subproblema B el cual determina las variables X_T y X_S por medio de un proceso de optimización basado en programación cuadrática (despacho económico).

El subproblema B debe ser solucionado para cada una de las etapas en el horizonte de planeamiento. El subproblema B corresponde al modelo de optimización presentado en la ecuación 2 teniendo en cuenta que tanto la generación hidráulica como los volúmenes de los embalses son dados, así las variables X_T y X_S son función de X_H .

$$\min \sum_{k=1}^{NT} C(P_{(k,t)})$$

sa

$$C(P_{(k,t)}) = \frac{a_k}{2} \cdot P_{(k,t)}^2 + b_k \cdot P_{(k,t)}$$

$$F_{(km,t)} = \frac{\theta_{(k,t)} - \theta_{(m,t)}}{X_{(km)}} \tag{2}$$

$$P_{(k,t)} - D_{(k,t)} = \sum_{m=1}^L F_{(km,t)}$$

$$P_{k \min} < P_{(k,t)} < P_{k \max}$$

$$F_{km \min} < F_{(km,t)} < F_{km \max}$$

El subproblema A recibe las variables X_T con las cuales puede encontrar la función objetivo, de acuerdo a esta función se realizan los cambios necesarios en X_H para hacer una mejora por medio del mecanismo de mutación, selección y recombinación. A diferencia del enfoque convencional, las variables X_H no corresponden

directamente a los caudales o volúmenes de las diferentes plantas hidráulicas.

En el modelo propuesto, las variables X_H corresponden a números reales entre cero y uno que indican el porcentaje del volumen útil a ser turbinado en cada periodo de tiempo.

El volumen útil se define como la cantidad de agua disponible en cada embalse para cada periodo de tiempo:

$$V_{u(i,t)} = \min \{ V_{(i,t-1)} + A_{(i,t)} \cdot \tau; V_{\max} \} \quad (3)$$

La generación hidráulica en cada periodo, se calcula como:

$$P_{(i,t)} = \rho \cdot \frac{V_{u(i,t)}}{\tau} \cdot X_{H(i,t)} \quad (4)$$

Esta generación es restada en la demanda del nodo i para calcular las potencias generadas por las plantas térmicas por medio del subproblema B. De acuerdo a esta codificación, la generación hidráulica cumple con las restricciones de volumen de forma implícita con lo cual las restricciones de factibilidad son simplificadas al punto de solo exigir la desigualdad 5:

$$0 < X_{H(i,t)} < 1 \quad (5)$$

En el subproblema B las posibles infactibilidades son modeladas por medio de centrales térmicas ficticias con valor a_k igual a cero y b_k igual al costo de racionamiento, desde luego el proceso de optimización despacha por sí solo las plantas reales antes de despachar las ficticias, éstas entrarían en operación solo en dos casos: si el sistema presenta restricciones en la red que impidan la generación real o si presenta muy baja oferta hídrica haciendo imposible cubrir la demanda con las plantas térmicas existentes, en ambos casos, la solución presentara sobre-costos que hacen dichas soluciones poco atractivas desde el punto de vista del subproblema A.

5.2 Algoritmo evolutivo

Inicialmente se genera aleatoriamente una población inicial con valores de X_H entre 0 y 1:

$$X_{H(i,t)} = \text{Rand}(0,1) \quad (6)$$

Sobre cada uno de los elementos de la población se calcula las variables dependientes como los volúmenes de los embalses y la cantidad de caudal turbinado.

Esta solución es enviada al sub-problema B el cual determina las potencias generadas por las plantas térmicas, los ángulos nodales y los flujos de potencia,

esta solución permite determinar la función objetivo para cada individuo.

Una vez calculadas las funciones objetivo se procede a la selección, para esto se utiliza el mecanismo de torneo el cual elige dos o más individuos de forma aleatoria, el que presenta una mejor función objetivo es denominado padre y tiene derecho a reproducir sus características en un individuo de la siguiente generación. Mediante este mecanismo se generan dos padres distintos los cuales generan un nuevo individuo.

El nuevo individuo generado corresponde a una combinación lineal entre los padres (p_1, p_2) correspondientes, como se muestra en la ecuación 7:

$$X_{H(i,t)} = X_{H(i,t)}^{(p_1)} + \sigma \cdot (X_{H(i,t)}^{(p_1)} - X_{H(i,t)}^{(p_2)}) \quad (7)$$

En donde σ es un parámetro de escala aleatorio entre cero y σ_{\max} el cual es parámetro del algoritmo:

$$\sigma = \text{Rand}(0, \sigma_{\max}) \quad (8)$$

Si el nuevo valor es menor a cero o superior a uno, se acerca al límite correspondiente.

La mutación se realiza cambiando uno o varios elementos de $X_{H(i,t)}$ de forma aleatoria (de la misma forma en que es inicializado el sistema).

5.2 Análisis de sensibilidad

Una vez encontrada la solución óptima se determina la variación de la función objetivo frente a variaciones en la predicción de las afluencias y la demanda. La decisión a tomar frente al caudal turbinado se mantiene mientras que se hace una variación en cada una de las afluencias y la demanda. Puesto que se desea encontrar condiciones críticas, las variaciones de la demanda se hacen por encima de la predicción mientras que las afluencias se realizan por debajo de valor establecido en la predicción.

6. RESULTADOS OBTENIDOS

El modelo propuesto es aplicado sobre un sistema presentado en [8] con algunas modificaciones. Toda la metodología fue implementada en Matlab 6.5. Los datos del sistema se muestran a continuación:

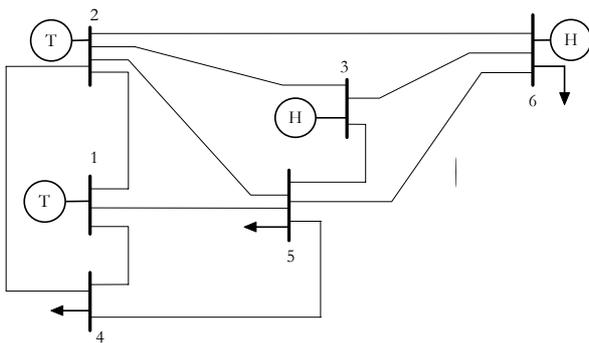


Figura 3. Sistema de prueba.

Los datos de las cargas son mostrados en la tabla 1:

Nodo1	Nodo2	X [pu]	F _{max} [pu]
1	2	0.20	1
1	4	0.05	1
1	5	0.08	1
2	3	0.05	1
2	4	0.05	1
2	5	0.10	1
2	6	0.07	1
3	5	0.12	1
3	6	0.02	1
4	5	0.20	1
5	6	0.10	1

Tabla 1. Datos del sistema.

Nodo	a / 2	b	P _{max} [pu]	P _{min} [pu]
1	108	1166.9	2	0.5
2	176	1033.3	1.5	0.375

Tabla 2. Plantas térmicas.

Nodo	Factor Turb.	V _{inicial}	V _{final}	V _{max}	V _{min}
3	1	20	0	25	0
6	1	15	0	25	0

Tabla 3. Unidades hidráulica.

Nodo	P1	P2	P3	P4	P5	P6
4	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.9
5	0.7	0.73	0.75	0.78	0.81	0.85
6	0.7	0.75	0.75	0.77	0.79	0.9

Tabla 4. Demanda del sistema.

Planta	A1	A2	A3	A4	A5	A6
H1	0.343	0.115	0.338	0.412	0.144	0.042
H2	0.148	0.125	0.142	0.222	0.115	0.374

Tabla 5. Afluencias de los embalses [m3/s].

El algoritmo evolutivo fue adecuado con los parámetros mostrados en la tabla 6:

Número de generaciones	100
Tamaño de la población	30
σ _{max}	0,8
Número de mutaciones por generación	4
Iteraciones de la simulación	200

Tabla 6. Parámetros de optimización.

El proceso de convergencia se muestra en la figura 4:

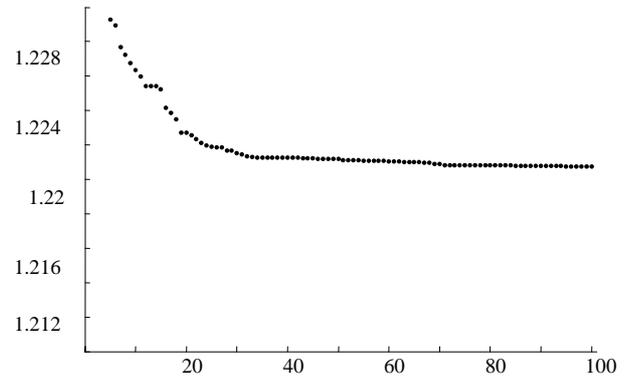


Figura 4. Convergencia del algoritmo

La solución óptima encontrada se muestra en la tabla 7.

	A1	A2	A3	A4	A5	A6
H1	0.4047	0.4032	0.4741	0.5901	0.9955	1.0000
H2	0.0195	0.2289	0.2480	0.2068	0.3702	1.0000

Tabla 7. Solución óptima encontrada

En los últimos periodos se utiliza el 100% del embalse mientras que en las etapas iniciales se almacena agua para las etapas siguientes debido a las deficiencias que se pueden presentar en períodos futuros. En la etapa de simulación se procede a variar la demanda y las afluencias para obtener la desviación en la función objetivo manteniendo la decisión porcentual invariable. En la figura 5 se presenta la sensibilidad con respecto a las afluencias mientras que en la figura 6 se muestra la variación respecto a la demanda.

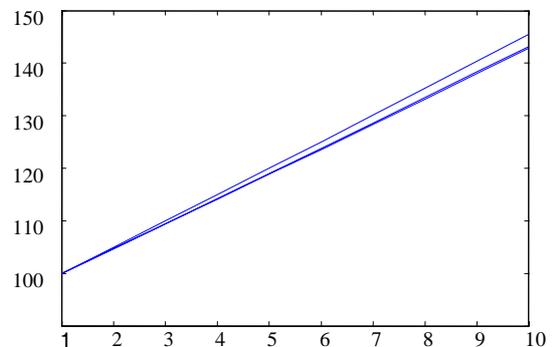


Figura 5. Función objetivo vs. variación en la demanda

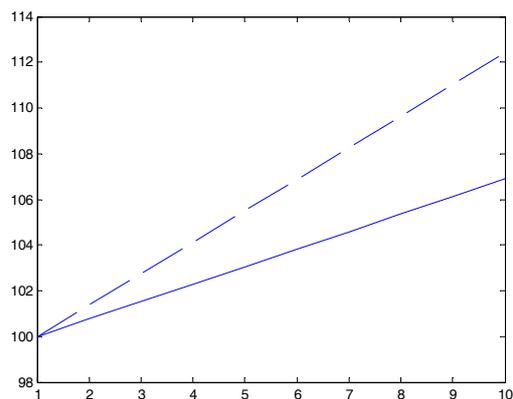


Figura 6. Función objetivo vs Variación en las afluencias

En este sistema, un aumento de hasta el 10% en la predicción de la demanda produce un aumento cercano al 50% en los costos operativos asociados (manteniendo la decisión de utilizar el porcentaje del volumen útil dado en el proceso de optimización). De igual forma una disminución de hasta el 10% en la predicción de las afluencias produce un aumento de entre el 6% y el 12% en los costos asociados. El comportamiento de las gráficas es lineal frente a variaciones pequeñas en las predicciones, en caso de variaciones grandes las gráficas correspondientes pueden ser representadas por funciones lineales por tramos.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos al grupo de investigación en sistemas eléctricos de la universidad tecnológica de pereira.

8. CONCLUSIONES

Es posible desarrollar modelos de programación cuadrática para el problema de despacho hidrotérmico que busquen representar de una manera más realista el costo operativo de las plantas térmicas.

El problema de despacho hidrotérmico, se puede resolver vía algoritmos evolutivos bajo un enfoque diferente a la manera de solución tradicional. Las variables de decisión y la codificación fué modificada buscando dos objetivos: una mejor representación del problema y una mayor simplicidad de programación con el fin de mejorar la eficiencia computacional.

El modelo utilizado es una versión más sofisticada con respecto a modelos que utilizan despacho en nodo único y funciones de costo lineales, por lo que produce una solución más realista.

Se presentan resultados sobre un sistema de prueba que muestran que el algoritmo puede ser utilizado para

resolver problemas de mayor escala, bajo un adecuado manejo de los datos de entrada.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. B.G. Gorenstin, N.M. Campodónico, J.P. Costa, M.V.F. Pereira, "Stochastic Optimization of a Hydrothermal System Including Network Constraints", IEEE Transactions on PAS, Vol. 7, No. 2, May 1992.
- [2]. Camac Gutierrez, Daniel Javier. "Programación dinámica dual determinística en el despacho hidrotérmico". Tesis. Universidad Católica de Chile.
- [3]. Christoforos E Zoumas, et al. A genetic algorithm solution approach to the hydrothermal coordination problem. IEEE Transactions on power systems. Vol 19 N° 2. May 2004.
- [4]. Guoqiang Peter Zhang. "An investigation of neural networks for linear time-series forecasting". *Computers & Operations Research* 28. (2001) 1183-1202
- [5]. Mokhtar S. Bazaraa, Hanif D. Sherali, C. M. Shetty. *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms*. John Wiley & Sons.1993.
- [6]. Coleman, T.F. and Y. Li, "A Reflective Newton Method for Minimizing a Quadratic Function Subject to Bounds on some of the Variables," *SIAM Journal on Optimization*, Vol. 6, Number 4, pp 1040-1058, 1996.
- [7]. GARCÉS R., Alejandro., GALVIS M, Juan C. GALLEGO R., Ramón A. "Un nuevo modelo de despacho hidrotérmico en ambientes de mercado usando algoritmos genéticos." *Revista Ciencia Et Technica*. Año XII, No 30. Mayo de 2006. UTP. ISSN 0122-1701.
- [8]. Word Allen, Wollenberg Bruce. *Power generation, operation and control*. John Wiley & sons. 1984.
- [9]. Luis S, Vargas, et al. A scenario simulation approach for market power analysis in hydrothermal systems. IEEE Transactions on power systems, Vol 18 N° 3. Agosto 2003.