

Métodos de solución aplicados al problema de coordinación hidrotérmica a corto plazo

Agustín Marulanda*, María Artigas, Jorge Vilchez

Departamento de Potencia, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela.

Resumen.-

El uso eficiente de los recursos energéticos es uno de los aspectos fundamentales en la operación de los sistemas eléctricos de potencia, generalmente la energía disponible proviene de generadores de diversas fuentes primarias, como combustibles fósiles y energía hidráulica. Para lograr una correcta administración de los recursos energéticos es necesario elaborar programas de generación para todas las unidades de generación. Este trabajo describe las técnicas de optimización más importante utilizadas en el problema de coordinación hidrotérmica a corto plazo, por medio de la recopilación y clasificación de las publicaciones científicas de mayor impacto internacional en los últimos 50 años. Así, los métodos de optimización utilizados para resolver el problema de coordinación hidrotérmica se clasifican en clásicos y metaheurísticos. Los primeros abarcan desde los tradicionales como: lista de prioridad, programación dinámica, hasta los más sofisticados como relajación lagrangiana, mientras que los segundos contemplan nuevas tendencias en la búsqueda por alcanzar el óptimo global, entre los cuales destacan: Búsqueda tabú, recocido simulado, algoritmos genéticos y enjambre de partículas.

Palabras clave: Coordinación hidrotérmica, corto plazo, optimización, sistemas de potencia.

Solution methods applied to the short-term hydrothermal coordination problem

Abstract.-

The efficient use of energy resources is one of the key aspects in the operation of electrical power systems, the available energy generally comes from different sources like fossil fuels and hydropower. To achieve efficient management of energy resources is necessary to develop generation programs among different types of generation units. This paper describes the most important optimization techniques used in the short-term hydrothermal coordination problem, through the collection and classification of specialized literature in the last 50 years. Thus, the optimization methods used for solving the hydrothermal coordination problem are classified into classic and metaheuristics. The first covers from the traditional methods such as the priority list, dynamic programming, even the most sophisticated method as Lagrangian relaxation, while the second provides for new trends in the search to reach the global optimum, among which are: Tabu search, simulated annealing, genetic algorithms and particle swarm.

Keywords: Hydrothermal coordination, Short term, optimization, power electrical systems.

Aceptado: junio 2011

Recibido: mayo 2010

1. INTRODUCCIÓN

El uso eficiente de los recursos energéticos es uno de los aspectos prioritario en la operación de

* Autor para correspondencia

Correo-e: amarulanda@fing.luz.edu.ve (Agustín Marulanda)

los sistemas eléctricos de potencia. Especialmente en los sistemas hidrotérmicos, donde el suministro de energía eléctrica está supeditado a la disponibilidad de recursos hídricos y a la capacidad de almacenamiento de energía, así como a la producción nacional de combustibles fósiles (gas, carbón y fuel-oil).

Para lograr una administración eficiente de los recursos energéticos disponibles, resulta fundamental la elaboración de los programas de generación sobre de manera de minimizar los costos y asegurar la confiabilidad del suministro. Evidentemente, la programación de la generación para sistemas hidrotérmicos es un problema estocástico que debe adaptarse a las características particulares de cada sistema.

La coordinación hidrotérmica busca una distribución entre la generación térmica e hidráulica, para satisfacer una demanda de energía eléctrica en un periodo definido. Esta coordinación entre la generación térmica e hidráulica, debe realizarse con ciertos criterios para obtener el menor costo posible de generación y cumplir con las limitaciones técnicas de las centrales. Además, se debe tomar en consideración los periodos de estudio; los cuales típicamente se dividen en corto y largo plazo.

El problema a corto plazo tiene por objetivo determinar el arranque y parada de las centrales térmicas, así como la potencia generada por las centrales térmicas e hidráulicas durante el horizonte temporal. Por otro lado, con la coordinación hidrotérmica a largo plazo se pretende desarrollar una estrategia de operación de uno a cinco años. La elaboración de esta estrategia debe tomar en cuenta predicciones de consumo, diferentes escenarios hidrológicos, variaciones anuales y estacionales de las reservas hidráulicas, los valores y costos esperados de generación térmica, factores de indisponibilidad de cada unidad y las probabilidades de escasez de energía.

Se puede pensar en el problema de coordinación hidrotérmica como un problema de despacho económico clásico, donde además de tomar en cuenta las centrales térmicas, se incluyen las centrales hidráulicas, los acoplamientos temporales y se modelan otras variables relacionadas con el

entorno energético del sistema de potencia.

La coordinación hidrotérmica a corto plazo es un problema de optimización matemática combinatorial y determinista, en el cual se desprecia todo tipo de incertidumbres (en la disponibilidad de los equipos, en la demanda y en las aportaciones hidráulicas), ya que en estos horizontes temporales las previsiones apenas difieren de la realidad [1]. Además, es usual no incluir la red de transporte en los modelos a corto plazo debido a la complejidad que introduce y porque consideraciones de este tipo no suelen afectar las decisiones de arranque y parada de las centrales [1]. De esta manera, se simplifica el modelo de la red de energía eléctrica de forma que se considera uninodal; toda la demanda del sistema se representa en un nodo, con el cual se desprecia el sistema de transporte y por consiguiente las pérdidas.

La solución adecuada de este problema puede significar importantes ahorros a la operación de los sistemas eléctricos, desde la década de 1950 se han planteado alternativas de solución que combinan métodos de optimización tradicionales con técnicas empleadas en el campo de la inteligencia artificial, pasando por métodos heurísticos. La mayoría de estos métodos de solución están basados en una descomposición del problema en dos subproblemas: el arranque y parada de las unidades térmicas (*unit commitment*) y la programación de las centrales hidráulicas. En la mayoría de los métodos empleados, la solución se obtiene por medio de un proceso iterativo con la solución de los dos subproblemas [2].

Los métodos de optimización utilizados se pueden clasificar en: métodos clásicos y métodos metaheurísticos. Los primeros, que buscan y garantizan un óptimo local, incluyen la programación lineal, lineal entera mixta, dinámica, entre otros. Por otro lado, los métodos metaheurísticos tienen mecanismos específicos para alcanzar el óptimo global aunque no garantizan su alcance, entre los que destacan: Búsqueda tabú, recocido simulado y algoritmos genéticos. A continuación se hace un resumen de los métodos más importantes utilizados en la resolución del problema de coordinación hidrotérmica a corto plazo.

2. LISTA DE PRIORIDAD

La lista de prioridad ordena a las centrales de generación de acuerdo a su costo medio de producción a potencia máxima [3]; de esta forma las centrales de menor costo ocupan las primeras posiciones de la lista. Las centrales se acoplan o desacoplan para cumplir las restricciones de carga del sistema siguiendo el orden establecido en la lista. Este método se emplea únicamente en la solución del problema de la programación horaria de centrales térmicas, donde no toma en cuenta los costos de arranque y parada de las centrales.

Este método heurístico es muy sencillo y fácil de implementar. Requiere poca memoria y poco tiempo de cálculo. Sin embargo, al no tener en cuenta la variación del costo con la potencia producida o los costos de arranque y parada de las centrales, no puede garantizar la optimalidad de la solución encontrada. Además, este método requiere el empleo de reglas heurísticas para la consecución de una solución posible.

3. PROGRAMACIÓN DINÁMICA

La programación dinámica surge en los años 1950, como producto de los trabajos de investigación del matemático Richard Bellman en el área de problemas de decisión multietapa [4]. Es un enfoque general para la solución de problemas en los que es necesario tomar decisiones en etapas sucesivas. La solución de problemas mediante esta técnica se basa en el llamado principio de optimalidad enunciado por Bellman en 1957 [5]: “En una secuencia de decisiones óptima toda subsecuencia ha de ser también óptima”.

Para que un problema sea abordado por esta técnica ha de cumplir dos condiciones. La solución del problema debe alcanzarse a través de una secuencia de decisiones, una en cada etapa y dicha secuencia de decisiones debe cumplir el principio de optimalidad [6]. La técnica de programación dinámica ha sido desarrollada con éxito en el despacho económico de centrales térmicas, en la solución práctica del problema de *unit commitment* y en la solución del problema de coordinación hidrotérmica [3], donde se caracteriza por la definición de etapas y de estados.

En el caso de la programación de centrales térmicas, la programación dinámica busca el espacio de soluciones que contiene la solución óptima del estado de arranque o parada de las unidades de generación. Los periodos de estudios son conocidos como las etapas del problema de programación dinámica, típicamente cada etapa representa una hora de operación. La combinación de las unidades de generación en un periodo es conocida como los estados del problema de programación dinámica. En cada etapa se define una serie de estados (resulta útil la representación gráfica en un diagrama de estados). Cada nodo asociado a una etapa del diagrama de estados, representa un posible estado en el que se puede encontrar el sistema en la etapa considerada. Las posibles transiciones de un estado, en cierta etapa, a otro estado, en una etapa posterior, se representan mediante flechas entre estos estados.

A pesar de que la programación dinámica permite modelar la no linealidad y no convexidad del problema hidrotérmico, por su naturaleza combinatorial, su aplicación directa resulta poco práctica debido a las dimensiones matemáticas del problema y el excesivo tiempo computacional necesario para obtener una solución cercana al óptimo [7]. Esto se debe a la naturaleza enumerativa del método, debido a que el tiempo computacional se expande exponencialmente con el tamaño del problema y lo eleva a un nivel que se convierte poco práctico usarlo [8] y [9].

En la práctica, muchas estrategias heurísticas, como el esquema de lista de prioridad, se han introducido para limitar la búsqueda dinámica para sistemas eléctricos de gran tamaño y reducir así el tiempo computacional. En [10], [11] y [12] se presentan variantes de la programación dinámica por medio de técnicas heurísticas, mientras que en [13] se presenta una técnica que combina la programación dinámica con aproximación sucesiva para resolver el problema de coordinación hidrotérmica.

4. PROGRAMACIÓN LINEAL

La programación lineal es quizás la técnica de programación matemática más ampliamente

aplicada, en su estado más simple busca el valor óptimo de una función objetivo de tipo lineal mientras satisface un grupo de restricciones lineales. En sistemas eléctricos de potencia, ha tenido mucho éxito en áreas como la programación de la generación y minimización de pérdidas. El primer algoritmo diseñado para el problema de programación lineal fue el algoritmo simplex, propuesto por Dantzig en 1947 para resolver problemas de planificación de la Fuerza Aérea de Estados Unidos [14].

En [15] se describe un programa para optimizar la generación hidroeléctrica de Australia, donde los autores hacen uso de la linealización por tramos para convertir las funciones no lineales, típicas del problema de coordinación hidrotérmica, en restricciones lineales.

Durante los últimos años se han producido avances significativos en la programación lineal por el desarrollo por parte de Karmarkar [16] de un método de punto interior para resolver problemas de programación lineal.

4.1. Método de Punto Interior

Propuesto por Karmarkar, en 1984, el método de punto interior es un algoritmo cuya complejidad computacional es de tipo polinomial, que compite frente al método simplex para resolver problemas de programación lineal de gran tamaño, como el problema de coordinación hidrotérmica. Muchas han sido las mejoras propuestas al algoritmo original, la variante más utilizada es el algoritmo primal-dual con barrera logarítmica propuesto por Meggido [17] en 1989.

El método de puntos interiores es un proceso iterativo que a partir de un punto inicial x^0 dentro de la región factible sigue una trayectoria que alcanza la solución óptima (x^*) después de algunas iteraciones, todos los puntos x^i de la trayectoria continúan dentro de la región factible (puntos interiores), y se encuentra una buena estimativa de la solución óptima después de las primeras iteraciones [18].

En los últimos años, los métodos de puntos interiores han sido ampliamente utilizados en la solución de problemas de optimización, y algunos de sus conceptos ya se han aplicado

en la programación no lineal y programación entera [19].

En 1996, Christoforodis [20] propone uno de los primeros algoritmos de punto interior para el problema de coordinación hidrotérmica basado en predictor corrector primal-dual, donde demuestra que el método de punto interior puede ser utilizado con éxito para resolver la coordinación hidrotérmica en sistemas de gran tamaño. En 1998, Medina [21] presenta una comparación de los métodos de punto interior aplicados al problema de coordinación hidrotérmica, donde concluyen que los diferentes métodos de punto interior aplicados a la coordinación hidrotérmica son más rápidos que los basados en el método simplex.

5. PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA MIXTA

La programación lineal entera mixta (*Mixed Integer linear Programming*, MILP) es una modificación de la programación lineal donde algunas de las variables son enteras y pueden tomar valores binarios (0/1). Esta característica permite modelar de forma más adecuada el arranque y parada de las unidades de generación.

En los últimos años la programación lineal entera mixta ha tenido un avance significativo enfocado en los algoritmos utilizados. Esto ha permitido añadir de forma más fácil las restricciones del problema e incluir las no linealidades con mayor exactitud, por medio de la aproximación lineal por tramos [3]. Además, el uso de variables enteras permite modelarla naturaleza discreta del arranque y parada de las unidades de generación. El problema a resolver puede ser bastante complicado y la solución se puede obtener en un tiempo razonable, sin pérdida de precisión [22].

Asimismo, la revolución en los métodos computacionales de optimización ha hecho posible contar con computadoras más potentes y la mejora en los algoritmos desarrollados, esto hace posible resolver problemas que se pensaban irresolubles. Aunado a esto, la aparición de códigos modernos comerciales en programación lineal y entera, tales como Cplex, Lindo, Osl y Xpress-MP, los cuales son muchos más poderosos que los algoritmos

que existían unos 20 años atrás; permiten resolver problemas de mayor tamaño con menores tiempos computacionales.

En [23] y [24] se muestran desarrollos en programación lineal entera mixta para la coordinación de la generación hidráulica a corto plazo, donde se presentan modelos lineales a tramos de las funciones no lineales de las unidades hidroeléctricas y sus correspondientes restricciones dinámicas y discretas. También se presenta la formulación detallada del problema de programación lineal entera mixta para la coordinación hidrotérmica, por medio del uso de programas modernos de optimización.

Tradicionalmente los problemas de programación lineal entera mixta se han resuelto empleando los métodos de Bifurcación y acotación (*branch and bound*) y la descomposición de Benders.

5.1. Bifurcación y Acotación

La técnica de bifurcación y acotación es una de las más utilizadas para resolver los problemas de programación entera mixta, propuesto inicialmente por Land y Doig [25] en 1960 y posteriormente modificado por Dakin [26] en 1965 y Driebeek [27] en 1966. Este método halla la solución óptima de un problema entero mixto enumerando eficientemente los puntos en la región factible. El “árbol de enumeración” es la idea básica, el cual se forma por medio de un proceso denominado bifurcación (*branching*).

Los modelos propuestos de programación entera mixta, utilizan una función linealizada de costo aun cuando se disponen de modelos de costos más precisos. Además, la técnica de bifurcación y acotación sólo ha sido empleada en sistemas de tamaño moderado, debido a que los problemas de gran tamaño demanda un tiempo computacional demasiado largo.

En 1978, Dillon [28] presenta un desarrollo basado en el método de bifurcación y acotación para el problema de programación entera, con el cual resuelve la programación de las centrales de generación. Otro trabajo interesante lo presenta Christoforidis [29] en 1996, donde aplica la técnica de bifurcación y acotación para resolver el problema de coordinación hidrotérmica

al sistema de generación de Suiza. Sin embargo, a pesar que Christoforidis demuestra que es computacionalmente posible resolver problemas de gran tamaño utilizando programación entera mixta, reconoce que el sistema eléctrico utilizado no es lo suficientemente grande como para crear dificultades computacionales al método.

5.2. Descomposición de Benders

El algoritmo de Benders es una de las técnicas de descomposición más comúnmente utilizadas en sistemas de potencia, introducida por J. F. Benders, el algoritmo de descomposición permite resolver problemas de programación lineal entera mixta de gran tamaño.

Para aplicar el método se descompone el problema global (coordinación hidrotérmica a corto plazo) en un problema maestro y un subproblema. El problema maestro es un problema de optimización cuyas variables representan los acoplamientos de las centrales térmicas, se trata por lo tanto de un problema de programación entera 0/1. Mientras que en el subproblema, las variables enteras (los acoplamientos de las centrales térmicas) se toman de la solución del problema maestro y así el subproblema se ocupa sólo de determinar la producción de cada central. Por lo tanto, se puede tratar como un problema de despacho económico y utilizar cualquier algoritmo para resolver el subproblema. El problema maestro y el subproblema de despacho económico se resuelven de forma iterativa hasta que la solución converja.

En cada iteración el problema maestro resuelve un problema de programación entera, mediante el cual se determinan los valores óptimos de las variables de acoplamiento de las centrales térmicas y se envía esta información al subproblema de despacho económico, luego el subproblema resuelve un algoritmo de despacho económico hidrotérmico. Resuelto el subproblema se envía un conjunto de variable duales del despacho económico al problema maestro, el maestro incorpora esta información generando un nuevo corte de Benders en cada iteración.

La mayor dificultad al aplicar la descomposición de Benders al problema de coordinación hidrotérmica a corto plazo es la determinación de

la solución del problema maestro, debido a que éste es un problema de programación entera 0/1 y presenta problemas en la solución de sistemas eléctricos de tamaño realista. Además, algunas restricciones son difíciles de manejar como lo son las restricciones no lineales de tiempo de arranque y parada de las centrales térmicas, las cuales generalmente son reemplazadas por restricciones más simples en el modelo [30].

Un buen ejemplo de esto se presenta en [31] donde los autores aplican la descomposición de Benders a un sistema de 30 centrales hidroeléctricas y 20 térmicas, en el cual sustituyen las restricciones no lineales de tiempo mínimo de funcionamiento y parada por una restricción lineal que sólo permite un máximo de un arranque por central y día. Este problema es abordado por Alguacil y Conejo [32], donde modelan las restricciones de arranque y parada de las centrales térmicas aplicado a un caso realista basado en el sistema eléctrico de España. El problema maestro calcula el esquema de arranque y parada de las centrales térmicas, mientras que el subproblema de Benders resuelve un flujo óptimo de potencia (*optimal power flow*, OPF). En [33] también se aplica la descomposición de Benders a través de un problema maestro y un subproblema de OPF, con la inclusión de técnicas de aceleración para reducir el número de iteraciones y el tiempo computacional.

6. MÉTODOS DE DESCOMPOSICIÓN PRIMAL

Estos métodos se basan en la descomposición del problema de coordinación de la generación hidrotérmica en dos subsistemas, uno hidráulico y otro térmico, con el propósito de facilitar el uso de técnicas de solución específicas en cada subproblema. En el subproblema hidráulico se determina la producción de las centrales hidráulicas, mientras que en el subproblema térmico se calcula la producción de cada central térmica. Para relacionar los dos subsistemas se definen unas funciones de coordinación, las cuales expresan el costo total del sistema en función de la producción hidráulica. Además, se define una función de

coordinación primal para cada periodo la cual expresa el costo total de producción en ese periodo en función de la producción hidráulica del mismo.

En [34] se descompone el problema de coordinación hidrotérmica a corto plazo en dos subproblemas; hidráulico y térmico. El subproblema hidráulico es formulado como un problema de programación de flujo de red (*Network Flow Programming*) no lineal y resuelto a través del método de gradiente reducido, mientras que el subproblema térmico lo resuelven utilizando algoritmo de despacho económico y coordinación de centrales. El acoplamiento entre los dos subsistemas se realiza por medio de la ecuación de balance de energía. En [35] también se utiliza la programación de flujo de red para el subproblema hidráulico, en cambio el problema térmico lo resuelven por medio un flujo óptimo de potencia.

Por otro lado, el trabajo reportado en [36] usa una función de penalización para descomponer el sistema en hidráulico y eléctrico. La solución de ambos subproblemas se basa en división de las variables en básicas (dependientes) y no básicas (independientes), tal como en el método del gradiente reducido.

7. RELAJACIÓN LAGRANGIANA

La técnica de relajación Lagrangiana es uno de los procedimientos más utilizados para resolver el problema de coordinación hidrotérmica a corto plazo, en los últimos años. Esta técnica se empezó a utilizar a finales de los años 70 y principios de los 80 en la resolución del problema de coordinación hidrotérmica como herramienta de ayuda, para generar cotas inferiores, en los algoritmos debifurcación y acotación [37].

La relajación lagrangiana es una técnica matemática para resolver problemas de optimización con restricciones. La idea básica del algoritmo es utilizar multiplicadores de Lagrange para relajar los requerimientos de demanda y reserva del sistema eléctrico. Así, este nuevo problema (llamado problema dual) se puede descomponer en un subproblema por cada central térmica y un subproblema por cada cuenca hidráulica. Luego, los multiplicadores se ajustan en forma iterativa a

su nivel más alto, el llamado “problema dual” [38]. Es decir, gracias a la aplicación del método de la relajación lagrangiana se pasa de la resolución de un problema muy complejo y de gran tamaño a la resolución de muchos problemas de pequeño tamaño y estructuras homogéneas; esto permite modelar en forma más detallada cada central de generación y aplicar a cada subproblema la técnica de optimización que más se adapte a su estructura.

En optimización, si el problema primal es convexo, entonces la solución óptima del problema primal coincide con la solución óptima del problema dual. Además, la resolución de este último es más fácil que la resolución del problema primal. Sin embargo, la relajación de las restricciones causa una diferencia entre la solución primal y la solución dual, llamado “error de dualidad”. Por consiguiente, la solución óptima dual raras veces satisface las restricciones de reserva rodante y balance de potencia. Por lo tanto, es necesario buscar una solución subóptima factible cercana al punto óptimo dual. La relajación lagrangiana permite resolver de forma iterativa los subproblemas y actualizar los multiplicadores de lagrange de acuerdo a la amplitud de la violación de las restricciones de reserva rodante y balance de potencia [39].

La técnica básica del método consiste en los siguientes pasos: Resolver el problema dual, obtener una solución factible del problema primal y calcular el despacho económico para satisfacer la demanda. El paso 3 es un despacho económico multiperiodo, cuya solución está ampliamente referenciada en la literatura [3]. Mientras que para resolver el paso 2 la aplicación de técnicas heurísticas ha sido exitosas para obtener una solución primal factible. La complejidad del algoritmo radica en el paso 1, el cual requiere resolver un problema de maximización no diferenciable. En la literatura se reportan varias técnicas para resolver el problema dual, en [40] se presenta un desarrollo interesante basado en el método de planos secantes (*cutting planes*) el cual incorpora control adaptativo sobre la región factible.

A principios de los años noventa, comienzan a aplicarse técnicas de lagrangiano aumentado [41] y [42]. Esta técnica se basa en la definición y

resolución de un problema en el que no sólo se dualizan las restricciones, sino que también se introducen penalizaciones cuadráticas con el objetivo de forzar la factibilidad del problema primal.

8. MÉTODOS METAHEURÍSTICOS

Los métodos de optimización metaheurísticos adquieren importancia a partir de 1980, suelen inspirarse en procesos de optimizaciones naturales, tales como la teoría de la evolución, el templado de metales o el comportamiento de las colonias de hormigas, entre otros. El término heurístico está relacionado con la tarea de resolver problemas inteligentemente utilizando la información disponible, en el ámbito de la inteligencia artificial se usa el término para describir una clase de algoritmos que aplicando el conocimiento propio del problema y técnicas realizables, se acercan a la solución de problema en un tiempo razonable. El término metaheurística, introducido por Fred Glover [43] en 1986, se refiere a estrategias para diseñar o mejorar los procedimientos heurísticos con miras a obtener un alto rendimiento. Estos métodos se pueden clasificar en constructivos, evolutivos y de búsqueda.

Los métodos constructivos van incorporando elementos a una estructura inicialmente vacía que representa la solución, un ejemplo de este método lo es *Greedy Randomized Adaptive Search Procedures* (GRASP). Los métodos evolutivos consisten en generar, seleccionar, combinar y reemplazar un conjunto de soluciones, entre los más representativos se encuentran los algoritmos genéticos. Mientras que los métodos de búsquedas parten de una solución inicial y realizan procedimientos de búsquedas, la Búsqueda Tabú (*Tabu Search*) y el Templado Simulado (*Simulated annealing*) son las técnicas más utilizadas.

8.1. Búsqueda Tabú

La búsqueda tabúes un método iterativo para hallar un conjunto de soluciones factibles con las cuales se minimiza la función objetivo, diseñada para problemas de optimización combinatorial. Provee una forma para resolver problemas de

optimización con mínimo local; cuando se alcanza un óptimo local el algoritmo se ajusta a una nueva dirección de búsqueda para prevenir que el algoritmo quede atrapado en ese óptimo local. Para mejorar la eficiencia del método se suele combinar con otros algoritmos de optimización.

En forma general, consiste en clasificar ciertos movimientos como prohibidos o “tabú” para evitar que se caiga en ciclos durante la búsqueda y se define un conjunto de “vecindad”, $N(s)$, para cada solución, S . El algoritmo empieza desde una solución inicial, S^0 , y se mueve en forma iterativa a la mejor solución en la vecindad, $N(s)$, aunque un movimiento individual empeore la función objetivo. Con la finalidad de prevenir ciclos, el algoritmo no regresará a ninguna de las soluciones que hayan sido visitadas durante los últimos k pasos; estos k pasos corresponden a la lista tabú [44].

8.2. Recocido Simulado

El recocido simulado (*simulated annealing*) es una técnica de optimización combinatorial que se basa en el proceso físico de tratamiento térmico de materiales. En el recocido un metal es llevado a elevados niveles energéticos, hasta que alcanza su punto de fusión. Luego es enfriado en forma gradual hasta alcanzar un estado sólido de mínima energía, previamente definido. Por su naturaleza, este algoritmo debe ser formulado como un descenso a valle en el que la función objetivo es el nivel energético.

En el algoritmo del recocido simulado el número de iteraciones usadas es análogo al nivel de temperatura, en cada iteración se genera una solución candidata. Si esta solución es la mejor, entonces ésta es aceptada y usada para generar una nueva solución candidata, si ésta es una solución peor que la anterior, es aceptada cuando su probabilidad de aceptación (distribución de Boltzmann) sea mayor que un número aleatorio entre 0 y 1. En la próxima iteración, la temperatura se reduce de acuerdo a una función de sistema de estados. Entonces, la solución deteriorada es aceptada con una probabilidad cada vez menor a través de las iteraciones. El proceso de solución

continúa hasta que se alcance el número máximo de iteraciones o se consiga la solución óptima [45].

En [46] se desarrolla un algoritmo para la coordinación hidrotérmica a corto plazo basado en la técnica de recocido simulado. En el algoritmo se explica la incorporación de las restricciones de balance de potencia, descarga de agua, límite de los embalses y las restricciones de los límites de operación de los generadores hidráulicos y térmicos.

8.3. Algoritmos Genéticos

Los algoritmos genéticos fueron introducidos por John Holland [47] en la década de los setenta, es esencialmente un algoritmo de búsqueda de soluciones próximas a la óptima basado en la genética y el mecanismo de selección natural que se manifiesta entre individuos que compiten en un mismo ambiente. Los individuos mejores adaptados al ambiente tienden a transmitir su información genética a las futuras generaciones y así perpetuar sus habilidades.

Las tres principales operaciones asociadas con los algoritmos genéticos son la reproducción, el cruzamiento y la mutación. El método comienza con la creación de un conjunto de estructuras codificadas llamadas cromosomas (soluciones) que componen la población inicial, el criterio que valora la calidad de cada cromosoma es el entregado por el *fitness*; este corresponde a la evaluación de cada individuo mediante la función objetivo. Conocida la calidad de los individuos de la población estos son sometidos a un proceso de selección donde los individuos mejores “adaptados” tienen mayores posibilidades de ser elegidos como padres para el intercambio de información genética llamado cruzamiento. Luego un porcentaje de los individuos generados en el cruzamiento (hijos) son sometidos a un proceso aleatorio donde se genera un cambio en el cromosoma, conocido como mutación. Este proceso de mutación proporciona mayor diversidad en los individuos de la población.

Completados los procesos de cruzamiento y mutación, se genera la nueva población que reemplaza a la población original. Esto debe ser repetido hasta cumplir con algún criterio de

convergencia definido en el problema, cada uno de estos ciclos se conoce como generación.

La ventaja del uso de algoritmos genéticos es la gran flexibilidad en el modelo. Sin embargo, requieren un elevado tiempo de cálculo y ello implica que para sistemas eléctricos de tamaño realista resultan aún poco competitivos con otros procedimientos. En [48] se presenta un algoritmo genético aplicado a la solución del problema de coordinación a corto plazo, mientras que en [49] y [50] los autores combinan el algoritmo genético con la lista de prioridad y el método iterativo de lambda, respectivamente, para resolver la coordinación hidrotérmica de sistemas de tamaño medio.

8.4. Enjambre de Partículas

La técnica de optimización de Enjambre de Partículas (*Particle Swarm*) es una de las más recientes técnicas de optimización estocástica, introducida por Kennedy y Eberhart [51] en 1995 como una alternativa a los algoritmos genéticos. Está inspirada en el comportamiento social observado en grupos de individuos a partir de la interacción de éstos entre sí y con el entorno, tales como parvada de pájaros, enjambre de insectos y banco de peces.

Básicamente, la metaheurística de enjambre de partículas consiste en un algoritmo iterativo basado en una población de individuos denominada “enjambre”, en la que cada individuo, “partícula”, se dice que sobrevuela el espacio de decisión en busca de soluciones óptimas.

El algoritmo de enjambre de partículas, como cualquier algoritmo metaheurístico, provee una población inicial en la cual cada partícula cambia en el tiempo su posición o estado. Cada partícula vuela alrededor de un espacio de búsqueda multidimensional. Durante el vuelo, cada partícula ajusta su posición de acuerdo a su propia experiencia y las experiencias de las partículas vecinas, haciendo uso de la mejor posición encontrada por él y sus vecinos [52].

En [53] y [54] se presentan algoritmos de enjambre de partículas aplicados a la coordinación hidrotérmica a corto plazo, donde se estudia el efecto en el óptimo global de la selección de distintas partículas y se comparan los resultados

con numéricos con diferentes técnicas de solución, respectivamente. Mientras que [55] compara los resultados obtenidos al aplicar diferentes desarrollos del método de enjambre de partículas con los métodos de programación evolutiva y algoritmo genético, donde se demuestra que todos los algoritmos de enjambre de partículas tienen la habilidad de alcanzar una solución cercana a la global.

9. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta una revisión del estado del arte de los métodos de solución aplicados al problema de coordinación hidrotérmica a corto plazo. Los métodos considerados se han clasificados en dos grupos; los métodos clásicos que abarcan la mayoría de las tendencias y los métodos metaheurísticos que representa un nuevo enfoque para resolver los problemas de optimización y obtener una solución factible para la coordinación hidrotérmica. La mayoría de los métodos descritos han sido presentados con sus principales ventajas y desventajas, el método adecuado para resolver el problema depende de la naturaleza del mismo y el nivel de complejidad con el cual se ha represente el sistema. Es evidente que la búsqueda por mejorar los métodos existentes y la de desarrollar nuevas técnicas, representa un área abierta e interesante de investigación.

Referencias

- [1] Noemi Jimenez, N. (1998) “Coordinación Hidrotérmica en el Corto Plazo mediante Técnicas de Relajación Lagrangiana”, Universidad de Málaga-E.T.S. de Ingenieros Industriales, Tesis Doctoral. Málaga-España.
- [2] Garcia-González, J. y Castro, G.A. (2001), “Short-Term Hydro Scheduling With Cascaded And Head-Dependent Reservoirs Based On Mixed-Integer Linear Programming”, 2001 IEEE Porto Power Tech Conference.
- [3] Wood, A.J. y Wollenberg, B. F. (1996), “Power Generation, Operation and Control”, John Wiley and Sons Inc, New York.
- [4] Dreyfus, S. (2002). “Richard Beelman on the Birth of Dynamic Programming”. *Operations Research*, Vol. 50. No. 1, pp. 48–51.
- [5] Bellman, R. (1972). “Dynamic Programming”. Princeton University Press, Princeton, Sexta edición. New Jersey.

- [6] Guerequeta, R. y Vallecillo A. (2000). "Técnicas de Diseño de Algoritmos". Servicio de publicaciones de la Universidad de Málaga, segunda edición, Málaga.
- [7] Ferrero, R.W., Rivera, J.F., y Shahidehpour, S.M. (1998). "A Dynamic Programming Two-Stage Algorithm for Long-Term Hydrothermal Scheduling of Multireservoir Systems". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13. No. 4, pp. 1534–1540.
- [8] Ouyang, Z., y Shahidehpour, S.M., (1991) An Intelligent Dynamic Programming For Unit Commitment Application. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6. No. 3, pp.1203–1209.
- [9] Tang, J. y Luh, P:B. (1989). "Hydrothermal Scheduling Via Extenden Differential Dynamic Programming AndMixed Coordination". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4. No. 3, pp.1050–1056.
- [10] Pang, C.K., y. Chen, H.C. (1976). Optimal Short-Term Thermal Unit Commitment". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-95. No. 4, pp. 1336–1342.
- [11] Pang, C.K , Sheble, G.B. y Albuyeh, F. (1981). "Evaluation of dynamic programming based methods and multiple area representation for thermal unit commitments". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100. No. 3, pp. 1212–1219.
- [12] Snyder, W.L, Powell, H.D. y Rayburn, J.C. (1987). Dynamic Programming Approach to Unit Commitment. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PWRS-2 No. 2, pp. 339–349.
- [13] Yang, J.S. y. Chen, N. (1995). "Short-Term Hydrothermal Coordination Using Multi-Pass Dynamic Programming". IEEE Transactions on Power Systems, Vol.10 No.4. pp. :2021–2028.
- [14] Dantzig, G.B. (2002). "Linear Programming". Operations Research, Vol. 50, No. 1, pp. 42–47.
- [15] Piekutowski, M.R., Litwinowcz, T. y. Frowd, R.J. (1994). Optimal Short-Term Scheduling for a Large-Scale Cascaded Hydro System. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9. No. 2, pp.805–811.
- [16] Karmarkar, N. (1984). "A New Polynomial-Time Algorithm for Linear Programming". Combinatorica, Vol. 4, pp.373–395.
- [17] Meggido, N. (1989), "Pathway to the Optimal Set in Linear Programming," en Progress in Mathematical Programming: Interior Point and Related Methods, Springer Verlag, New York, pp. 131–158.
- [18] Wright, S. J. (1997), "Primal-Dual Interior-Point Methods", SIAM, Philadelphia.
- [19] Farhat, I.A., y El-Hawary, M.E. (2009), "Interior Point Methods Applications in Optimum Operational Scheduling of Electric Power Systems", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 3. No. 11, pp. 1020–1029.
- [20] Christoforidis, M., Aganagic, M., Awobamise, B., Tong, S and Rahimi, A.E. (1996) "Long-Term/Mid-Term Resource Optimization of a Hydro-Dominant Power System Using Interior Point Method". IEEE Transactions on Power System, Vol.11, No.1, pp. 287–294.
- [21] Medina, J., Quintana, V.H., Conejo A. y Perez-Thoden, F. (1998). "A Comparison of Interior-Point Codes for Medium-Term Hydro-Thermal Coordination". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 3, pp. 836–843.
- [22] Chang, G. W. y Waight, J. G. (1999). "A Mixed Integer Linear Programming based Hydro Unit Commitment". En IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Vol. 2, pp. 924–928.
- [23] Chang, G.W., Aganagic, M., Waight, J.G., Medina, J., Burton, T., Reeves, S. y Christoforidis, M. (2001). "Experiences with Mixed Integer Linear programming Based Approach on Short-Term Hydro Scheduling". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16. No. 4, pp. 743–749.
- [24] Simoglou, C.K., Biskas, P.N., y Bakirtzis, A.G. (2009). "A MILP Approach to the Short term Hydrothermal Self-scheduling Problem" En IEEE Power Tech Proceedings 2009, pp 1-8.
- [25] Land, A.H. y Doig, A.G. (1960). "An Automatic Method For Solving Discrete Programming Problems". Econometrica, Vol. 28. No. 3, pp. 497–520.
- [26] Dakin, R.J. (1965). "A Tree Search Algorithm for Mixed Integer Programming Problems". Computer Journal, Vol. 8. No. 3, pp. :250–255.
- [27] Driebeck, N.J. (1966). An Algorithm for the Solution of Mixed Integer Programming Problems. Management Science, Vol. 8. No. 7. pp. 576–587.
- [28] Dillon, T.S., Edwin, K.W., Kocks, H.D., y Taud, R.J. (1978). "Integer Programming Approach to the Problem of Optimal Unit Commitment with Probabilistic Reserve Determination". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97. No. 6, pp. 2154–2166.
- [29] Christoforidis, M., Awobamise, B, Frowd, R. y Rahimi, F. (1996). "Short-Term Hydro Generation and Interchange Contract Scheduling for Swiss Rail". IEEE Transactions on Power Systems", Vol. 11. No. 1, pp. 274–280.
- [30] Salam, S. (2007) "Unit Commitment Solución Methods". World Academy of Science Engineering and Technology. Vol. 35. pp.320–325.
- [31] Habibollahzadeh, H. y Bubenko, J.A. (1986). "Application of Decomposition Techniques to Short-Term Operation Planning of hidrothermal Power System". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS–1. No. 1, pp. 41–47.
- [32] Alguacil, N. y Conejo, A. (2000). "Multiperiod Optimal Power Flow Using Benders Decomposition". IEEE Transactions on Power Systems, Vol.15. No. 1, pp. 196–2001.
- [33] Sifuentes, W. y Vargas, A. (2007). "Hydrothermal Scheduling Using Benders Decomposition: Accele-

- rating Techniques". IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 22. No. 3, pp. 1351–1359.
- [34] Brannlund, H., Sjelvgren, D. y Andersson, N. (1986). "Optimal Short Term Operation Planning of a Large Hydrothermal Power System Based on a Nonlinear Network Flow Concept". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-1. No. 4, pp. 75–81.
- [35] Luo, G.X., Habibollahzadeh, H. y Semlyen, S.A. (1989). "Short-Term Hydro-Thermal Dispatch Detailed Model and Solutions". IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 4. No. 4, pp. 1452–1462.
- [36] Franco, P., Carvalho, M. y Soares, S. (1994). "A Network Flow Model for Short Term Hydro-Dominated Hydrothermal Scheduling Problems". IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 9. No. 2, pp. 1016–1022.
- [37] Lauer, G.S., Sandell, N.R., Bertsekas, D.P. y Posbergh, T.A. (1982). "Solution of Large-Scale Optimal Unit Commitment Problems". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-101. No. 1, pp. 79–86.
- [38] Yan, H., Luh, P.B., Guan, X. y Rogan, P.M. (1993). "Scheduling of Hydrothermal Power Systems". IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 8. No. 3, pp. 1358–1365.
- [39] Salam, M.S., Nor, K.M., y Hamdan, A.R. (1998). "Hydrothermal Scheduling Based Lagrangian Relaxation Approach to Hydrothermal Coordination". IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 3. No. 1, pp. 226–235.
- [40] Jiménez, N. y Conejo, A.J. (1999). "Short-Term Hydro-Thermal Coordination by Lagrangian Relaxation: Solution of the Dual Problem". IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 14 No. 1, pp. 89–95.
- [41] Wang, C. y Shahidehpour, S.M. (1995). "Short-Term Generation Scheduling with Transmission and Environmental Constraints Using an Augmented Lagrangian Relaxation". IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 10. No. 3, pp. 1294–1301.
- [42] Rodrigues, R.N., Da Silva, E.L., Finardi, E.C. y Takigawa F.Y. (2011). "Solving the Short-Term Scheduling Problem of Hydrothermal Systems via Lagrangian Relaxation and Augmented Lagrangian". Mathematical Problems in Engineering. vol. 2012, Article ID 856178, pp. 1–18.
- [43] Glover, F. (1986). "Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence". Computer and Operations Research, Vol. 13. No. 5, pp. 533–549.
- [44] Xaiomin, B. y Shahidehpour, S. (1996). "Hydro-Thermal Scheduling by Tabu search and Decomposition Method". IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 11. No. 2, pp. 968–974.
- [45] Wong, K., Fan, B., Chang, C. y Liew, A. (1995). "Multi-Objective Generation Dispatch using Bi-Criterion Global Optimization". IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 10. No. 4, pp. 1813–1819.
- [46] Wong, K. y Wong, Y. (1994). "Short-term Hydrothermal Scheduling part. I. Simulated Annealing Approach". IEEE Proceeding Generation, Transactions and Distribution. Vol. 141. No. 5, pp. 497–501.
- [47] Holland, J.H. (1975). "Adaptation in Natural and Artificial Systems". University of Michigan Press, Michigan.
- [48] Chen, P.H. y Chang, H.C. (1996). "Genetic Aided Scheduling of Hydraulically Coupled Plants in Hydro-Thermal Coordination". IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 11. No. 2, pp. 975–981.
- [49] Zoumas, C.E., Bakirtzis, A.G., Theoharis, J.B. y Petridis, V. (2004). "A Genetic Algorithm Solution Approach to the Hydrothermal Coordination Problem". IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 19. No. 2, pp. 1356–1364.
- [50] Senthil, V., y Mohan, M.R. (2011). "A Genetic Algorithm Solution to the Optimal Short-Term Hydrothermal Scheduling", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 33. No. 4, pp. 827–835.
- [51] Kennedy, J. y Eberhart, R.C. (1995). "Particle Swarm Optimization". In Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Vol. IV, pp. 1942–1948. Piscataway, NJ.
- [52] Titus, S. y Ebenezer, A. (2007). "Hydrothermal Scheduling Using an Improved Particle Swarm Optimization Technique Considering Prohibited Operating Zones". International Journal of Soft Computing. Vol. 2. No. 2, pp. 313–319.
- [53] Samudi, C., Das, G.P., Ojha, P.C., Sreeni, T.S. y Cherian, S. (2008). "Hydro-Thermal Scheduling Using Particle Swarm Optimization". En IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008, Vol. 21, pp. 1–5.
- [54] Hota, P.K., Barisal, A.K., y Chakrabarti, R. (2009). "An Improved PSO Technique for Short-term Optimal Hydrothermal Scheduling", Electric Power Systems Research, Vol. 79, No. 7. Pp. 1047–1053.
- [55] Yu, B., Yuan, X. y Wang, J. (2007). "Short-Term Hydro-Thermal Scheduling Using Particle Swarm Optimization Method". Energy Conversion and Management. Vol. 48. No. 7, pp. 1902–1908.