

Estado del arte de despacho económico hidro-térmico-eólico utilizando técnicas heurísticas

Estado da arte do despacho econômico hidro-térmico-eólico usando técnicas heurísticas

State of the art of hydro-thermal-wind economic dispatch using heuristic techniques

Peter Vallejo-Correa

pvallejoc@est.ups.edu.ec

Universidad Politécnica Salesiana – Ecuador

Carlos Barrera-Singaña

cbarrera@ups.edu.ec

Universidad Politécnica Salesiana – Ecuador

<https://orcid.org/0000-0003-1478-0952>

RESUMEN

La operación económica de sistemas de potencia vista desde la planificación de despacho de centrales de generación hidroeléctricas y termoeléctricas es un problema de optimización, que tiene como finalidad minimizar los costos de combustible de las unidades térmicas mediante la búsqueda del esquema de despacho óptimo en la que se disminuya el aporte de generación térmica, y se complemente el abastecimiento de la demanda del sistema con aporte de generación hidroeléctrica, para ello existen métodos deterministas, sin embargo su implementación a veces resultan complicados y no tan funcionales; por lo que surgen alternativas llamativas como el uso de técnicas heurísticas que logran resolver este problema de optimización con un concepto más simple; por lo tanto en este trabajo se presenta la formulación matemática del problema de despacho hidrotérmico y también cuando se integra fuentes de energía renovables no convencionales como la energía eólica. Además, brinda un análisis comparativo en base a los resultados obtenidos en diferentes artículos relevantes que dan solución a la problemática de programación hidrotérmica mediante la aplicación de técnicas heurísticas para un sistema de prueba estándar.

Palabras clave / Descriptores: Despacho económico de generación, Despacho económico hidrotérmico, Despacho económico hidro-térmico-eólico, Técnicas heurísticas.

RESUMO

A operação econômica de sistemas elétricos vista a partir do planejamento de despacho de usinas hidrelétricas e termelétricas é um problema de otimização, cuja finalidade é minimizar os custos de combustível das unidades térmicas buscando o esquema ótimo de despacho em que a contribuição da geração térmica seja reduzida, e o atendimento da demanda do sistema é complementado com a contribuição da geração hidrelétrica, para isso existem métodos determinísticos, porém sua implementação às vezes é complicada e pouco funcional; assim surgem alternativas marcantes como o uso de técnicas heurísticas que conseguem resolver este problema de otimização com um conceito mais simples; portanto, neste trabalho é apresentada a formulação matemática do problema de despacho hidrotérmico e também quando são integradas fontes de energia renováveis não convencionais como a eólica. Além disso, fornece uma análise comparativa com base nos resultados obtidos em diferentes artigos relevantes que resolvem o problema de programação hidrotérmica através da aplicação de técnicas heurísticas para um sistema de teste padrão.

Palavras-chave: Despacho econômico de geração, Despacho econômico hidrotérmico. Despacho econômico hidro-térmico-eólico, Técnicas heurísticas.

ABSTRACT

Hydrothermal planning has been seen as an optimization problem, where the aim is to minimize the fuel cost of thermoelectric power plants by searching the optimal dispatch scheme. The economic operation of power plants, thermal and hydro electrical units has been performed by deterministic methodologies, which the majority of times are extremely complicated to implement on large power systems. Set in this context, heuristic techniques have been implemented to solve the optimization problem in a simpler mathematical formulation including non-conventional renewable energy sources such as wind energy. The present analysis provides a comparative review based on the results obtained in different relevant articles that provide a satisfactory solution to the hydrothermal problem based on heuristic techniques for standard test systems.

Keywords: Generation economic dispatch, Hydrothermal dispatch, Hydro-thermal-wind dispatch, Heuristic techniques.

1. INTRODUCCIÓN

La planificación y operación de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) abordado desde el punto de vista económico con la programación hidrotérmica es un problema de optimización que a medida de los años ha ido evolucionando tanto en su nivel de complejidad como en las estrategias de solución que han venido siendo desarrolladas por muchos investigadores a nivel mundial. La programación hidrotérmica básicamente se refiere al problema de coordinación de despacho tanto de unidades de generación hidroeléctricas y térmicas con la finalidad de garantizar que los costos totales asociados a la producción de energía eléctrica a través de las centrales térmicas sean minimizados considerando las funciones de costos del combustible y restricciones de carga durante un determinado período de tiempo (Tehzeeb-ul-Hassan et al., 2020). Ante el crecimiento de la demanda eléctrica a lo largo de los años y las consecuencias ambientales que viene acarreado el planeta debido a la explotación de los recursos fósiles, la integración de energías renovables como alternativa para la producción de energía eléctrica se precisa como una estrategia con mucho potencial y grandes ventajas para la disminución de emisiones contaminantes a la atmósfera, de este modo el despacho económico hidrotérmico debe ser reformulado de tal manera que considere estas otras fuentes primarias para la producción de electricidad. Como energías alternativas renovables no convencionales se encuentran la solar, eólica, biomasa, geotérmica y mareomotriz, que permiten producir electricidad con un menor impacto hacia al ambiente aprovechando los recursos naturales al menor costo, que en realidad vendrían a ser nulos ya que el empleo de estos recursos primarios en calidad de combustibles para este tipo de centrales eléctricas representa un costo cero puesto que provienen y se pueden aprovechar directamente de la naturaleza. De todo el conjunto de fuentes de energía verdes mencionadas anteriormente, la energía eólica se considera como la más fundamental para la producción de energía eléctrica debido a las particulares ventajas que brinda ya que además de su uso principal para la producción de energía también se utiliza para el bombeo de agua y para otras diferentes aplicaciones prácticas (Banerjee et al., 2016). De tal manera, si se considera en conjunto centrales de generación hidroeléctricas, termoeléctricas y parques eólicos en el problema de despacho económico, la programación hidrotérmica como problema de optimización debe cambiar su enfoque al considerar la integración de centrales eólicas en la producción de energía eléctrica para abastecer la demanda de energía.

El despacho hidrotérmico en conjunto con la energía eólica es un problema que conlleva un mayor grado de dificultad en comparación al análisis que se debe llevar a cabo con la programación hidrotérmica ya que además de considerar las restricciones operativas tanto de las centrales térmicas y de las centrales hidráulicas se debe además tomar en cuenta algunas consideraciones relacionadas a las centrales eólicas y específicamente es muy importante considerar la incertidumbre del viento ya que éste es el recurso primario utilizado por este tipo de centrales eléctricas para la producción de electricidad (Dubey et al., 2016). La modelación asociada para el tema de predicción de perfiles de viento es un gran desafío debido a que es imposible predecir con certeza la velocidad del viento en una determinada zona por ello la utilización de diferentes modelos probabilísticos como la función de distribución de Weibull (Dubey et al., 2015; Yuan et al., 2015) permite llevar a cabo una aproximación de tal manera que se pueda formular el problema de despacho hidrotérmico con integración de energía eólica como fuente de energía adicional.

En la literatura se encuentran muchos trabajos enfocados y estructurados para la resolución del problema de programación hidrotérmica con técnicas deterministas, sin embargo, un limitante para la aplicación de este tipo de algoritmos al problema de despacho hidrotérmico yace en que al ser un problema de optimización no lineal y que involucra ciertas condicionantes altamente compuestas para la estructuración y definición del problema provocan que no funcionen adecuadamente o como se desearía que lo hagan, de esta manera una alternativa muy llamativa a las metodologías clásicas deterministas es el uso de heurísticas y metaheurísticas que también permiten llegar a obtener soluciones de alto nivel globalmente factibles que se podrían considerar cuasi-óptimas (Sinha & Lai, 2006) o incluso también es posible llegar a conseguir soluciones óptimas

globales para la planificación de despacho de las unidades de generación y sin la necesidad de requerir de mucha capacidad de procesamiento computacional (Nazari-Heris et al., 2017).

Considerando en un principio el problema de despacho hidrotérmico mediante la aplicación de métodos clásicos, varios autores proponen diferentes estrategias de solución, por ejemplo, abordando primero el uso de programación lineal se tienen (Chang et al., 2001; Gil & Araya, 2016; Jian et al., 2019) donde aplican programación lineal entera mixta (MILP) como método de solución. En (Wood & Wollenberg, 1996) en cambio se aplica la programación dinámica (DP) y también (Homem-De-Mello et al., 2011; Siqueira et al., 2006) emplean programación dinámica pero con un enfoque para programación a largo plazo; en (Zaghlool & Trutt, 1988) se utiliza el método de Newton, en (Salam et al., 1998) se utiliza el método de Relajación Lagrangiana como técnica de descomposición en el que divide el problema inicial en dos subproblemas: térmico e hidráulico y resuelve la parte térmica con programación dinámica. En referencia al uso de técnicas heurísticas y metaheurísticas para la resolución del problema de despacho hidrotérmico también muchos autores han contribuido con grandes trabajos aplicando este tipo de técnicas como en (Sinha et al., 2003b) donde usa programación evolutiva rápida como estrategia de solución, en (K. P. Wong & Wong, 1994) se utiliza la técnica de recocido simulado, también otra técnica en que se han basado para resolver el problema de programación hidrotérmica es mediante algoritmos genéticos desarrollada en (Gil et al., 2003; Kumar & Mohan, 2011; Wu et al., 2000) y también en (Yin Wa Wong, 2001) se propone un método de solución combinando tanto el uso de algoritmos genéticos y recocido simulado. El algoritmo de búsqueda tabú ha sido también utilizado en (Bai & Shahidehpour, 1996; Nayak & Rajan, 2012) como propuesta para la solución del problema de programación hidrotérmica.

La aplicación de técnicas heurísticas en los últimos años ha venido siendo una opción muy atractiva para la resolución de problemas de optimización complejos ya que su característica peculiar de ser métodos inspirados en la naturaleza ha permitido crear un catálogo amplio de algoritmos basados en métodos heurísticos teniendo así ya más de 100 algoritmos para ser aplicados a distintos problemas de optimización con alta complejidad (Tovey, 2018). Tomando en cuenta las ventajas que traen consigo las técnicas heurísticas para la resolución de diferentes problemas en la ciencia y como se observa que ya se han venido utilizando este tipo de técnicas en la parte de resolución de problemas en sistemas eléctricos de potencia y específicamente ya se ha abordado el problema de programación hidrotérmica aplicando estos métodos, el presente trabajo se enfoca en realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos por distintos autores que han aplicado este tipo de algoritmos al problema de despacho económico hidrotérmico y además brindar un análisis sobre la formulación y resolución que se ha tomado en cuenta cuando se adiciona centrales eólicas al problema de programación hidrotérmica para encontrar el esquema de despacho óptimo tanto de unidades de generación térmicas, unidades de generación hidráulicas y centrales eólicas garantizando la minimización de los costos asociados a la producción de energía con este tipo de fuentes generadoras y sus respectivas restricciones operativas y restricciones de carga para que el problema sea más realista.

2. DESPACHO ECONÓMICO EN LA GENERACIÓN

Un sistema eléctrico de potencia se encuentra conformado principalmente por cuatro componentes: generación, transmisión, distribución y los consumidores, cada uno de ellos cumple un rol fundamental y básicamente la generación se encuentra compuesta por todas las centrales generadoras del sistema y son las que se encargan de producir la energía que los usuarios finales consumen, por consecuencia al contar con una gran cantidad de centrales eléctricas ya sea del tipo de tecnología con el que se encuentren construidas surge un problema referente al factor económico debido a que el conjunto de posibles formas de despacho de la generación hacia el sistema es muy amplio, sin embargo no implica que dichas posibles soluciones sean las que garanticen que los costos asociados a dicho despacho sean los óptimos y mínimos, por ello el problema tradicional de despacho económico tiene como finalidad minimizar los costos operativos para producir toda la

energía que demanden los consumidores. El despacho económico es una tarea que se le asigna al operador del sistema independiente (ISO), es decir el problema de programación de las unidades generadoras se centraliza en este operador (De Queiroz, 2016) y es quien se encarga de tomar las decisiones referentes a la planificación del despacho económico para todo el sistema de potencia.

La programación de generación vista desde una estructura jerárquica se divide en tres etapas teniendo el despacho económico a largo plazo, corto plazo y en tiempo real (Marwali & Shahidehpour, 2000), siendo estos los horizontes temporales que se toman en cuenta para la planificación de la programación de las unidades de generación para el despacho de energía.

2.1 Despacho económico a largo plazo

Esta programación se caracteriza porque comprende períodos de tiempo que abarcan de uno a dos años y principalmente tienen como objetivo minimizar los costos totales de operación cuando a las unidades generadoras se les deba realizar mantenimientos preventivos programados y por ende tengan que salir de servicio, además la variación de tiempo (Δt) que se tiene en cuenta para su análisis considera incrementos por semanas.

2.2 Despacho económico a corto plazo

La diferencia primordial del despacho económico a corto plazo y largo plazo se basa en el período de tiempo que toma en cuenta cada uno de ellos y es que cuando se hace estudios de programación a corto plazo, el horizonte temporal puede ser semanal, diario u horario y la variación de tiempo incremental (Δt) es de una hora.

2.3 Despacho económico en tiempo real

O también definido como despacho económico dinámico, éste se preocupa y toma en cuenta el problema de incertidumbre futura que pueda llegar a afectar a la operación del sistema eléctrico o su confiabilidad, por lo que este tipo de despacho considera alguna actividad realizada del pasado para así poder ajustar adaptativamente una decisión de mantenimiento.

3. FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROBLEMA DE DESPACHO HIDROTÉRMICO

El objetivo principal del despacho económico hidrotérmico es buscar minimizar el costo total de generación de las centrales termoeléctricas considerando restricciones operativas tanto de las unidades de generación térmicas e hidráulicas.

3.1 Función objetivo

Matemáticamente el problema de optimización asociado a la programación hidrotérmica tiene como función objetivo el costo total de producción únicamente de las centrales térmicas debido a que los costos de producción de las centrales de generación hidráulicas se pueden considerar despreciables (Conejo et al., 2002). De esta manera la función objetivo se modela como una ecuación cuadrática tal como se muestra a continuación:

$$F_{nt}(P_{nt}) = a_n(P_{nt})^2 + b_n P_{nt} + c_n \quad (1)$$

De donde F_{nt} representa el costo de generación de la n -ésima unidad termoeléctrica en el periodo t , P_{nt} es la potencia generada por cada central generadora y mientras que a_n , b_n y c_n representan los coeficientes del costo de combustible de las n unidades térmicas consideradas para el problema de despacho.

3.2 Restricciones de igualdad

Definiendo la función objetivo del problema de despacho hidrotérmico, éste debe ser resuelto considerando varias restricciones para así lograr que el problema planteado de optimización sea mucho más realista. Las restricciones que se consideran en el problema de optimización son las siguientes:

3.2.1 Balance del sistema de potencia

La restricción de balance de potencia viene dada por la siguiente expresión:

$$\sum_{i=1}^{N_s} P_{si} + \sum_{j=1}^{N_h} P_{hj} = P_L + P_{Lossj} \quad (2)$$

De donde P_L es la demanda total de la carga que se debe abastecer, N_s corresponde al número de centrales termoeléctricas, N_h es el número de centrales hidroeléctricas disponibles, P_{si} es la potencia despachada por las centrales termoeléctricas, P_{hj} en cambio representa la potencia entregada por las centrales hidroeléctricas y P_{Lossj} representa las pérdidas existentes de los enlaces que componen el sistema de transmisión. Las pérdidas totales en el sistema de transmisión se pueden calcular a través de la siguiente expresión:

$$P_{Lossj} = \sum_{m=1}^{N_s+N_h} \sum_{n=1}^{N_s+N_h} P_{mt} B_{mm} P_{nt} + \sum_{m=1}^{N_s+N_h} B_{0m} P_{mt} - B_{00} \quad (3)$$

De donde B_{mm} , B_{0m} y B_{00} representan los coeficientes de pérdidas para el sistema.

3.2.2 Límites de capacidad de las plantas termoeléctricas

Las limitaciones operativas de las centrales térmicas se definen en (4):

$$P_{si_{min}} \leq P_{si}^t \leq P_{si_{max}} \quad (4)$$

$$i = 1, 2, \dots, N_s$$

De este modo la producción que tenga cada unidad térmica del conjunto N_s de plantas disponibles debe estar dentro del rango mínimo y máximo de su capacidad operativa de producción.

3.2.3 Límites de capacidad de las plantas hidroeléctricas

Las limitaciones operativas de las centrales hidráulicas se definen en (5):

$$P_{hjmin} \leq P_{hj}^t \leq P_{hjmax} \quad (5)$$
$$j = 1, 2, \dots, N_h$$

De igual manera que las restricciones de capacidad de las centrales térmicas, las unidades de generación hidroeléctricas también deben considerar los límites operativos de capacidad que presenten cada una de las centrales que entren en el conjunto N_h de plantas hidroeléctricas disponibles para abastecer la demanda.

3.2.4 Límites de descarga y reservorios para las centrales hidroeléctricas

Los límites de descarga del fluido hídrico y la capacidad de los reservorios que dispongan las centrales hidráulicas con embalses también son otro tipo de restricciones que se debe tomar en cuenta en el problema de optimización. Estas limitantes se expresan a continuación:

$$Q_{hjmin} \leq Q_{hj}^t \leq Q_{hjmax} \quad (6)$$
$$j = 1, 2, \dots, N_h$$

$$V_{hjmin} \leq V_{hj}^t \leq V_{hjmax} \quad (7)$$
$$j = 1, 2, \dots, N_h$$

De donde Q_{hj}^t corresponde a la liberación de agua, la cual debe estar entre los límites de descarga mínimos y máximos como se indica en (6), mientras que en (7) se muestra la restricción relacionada con los límites de volumen de almacenamiento de cada reservorio V_{hj}^t que dispongan las centrales hidroeléctricas.

3.3 Algoritmos heurísticos aplicados al problema de despacho hidro-térmico

Tomando como punto de partida los métodos deterministas empleados para encontrar la solución de programación hidrotérmica se tienen por ejemplo la técnica de búsqueda de gradiente (GS) o el método de relajación lagrangiana, sin embargo uno de los inconvenientes que presentan estos métodos es el dificultoso manejo que tienen con las restricciones que definen los límites operativos tanto de las centrales hidroeléctricas y térmicas, de esta manera alternativas como algoritmos basados en heurísticas que se caracterizan por ser métodos exploratorios que pueden ser empleados en problemas combinatorios para encontrar soluciones de alta calidad globalmente factibles (Hincapié Isaza et al., 2004) ya han venido siendo desarrollados en varios trabajos donde se han empleado técnicas como la de recocido simulado (SA), programación evolutiva (EP), optimización por enjambres de partículas (PSO), algoritmos genéticos (GA), el algoritmo basado en forrajeo de bacterias (BFA), el algoritmo de colonias de abejas artificiales (ABC), el algoritmo de polinización de flores (FPA), y muchos más que se encuentran disponibles en la literatura y que tienen como mismo objetivo planteado el encontrar soluciones óptimas globales para el problema de despacho económico con tiempos de CPU empleados realmente cortos en comparación con métodos clásicos (Balachander et al., 2018).

3.3.1 Análisis comparativo de resultados provistos por distintos algoritmos

La mayoría de los trabajos que han abordado el problema de despacho económico hidrotérmico han tomado como caso de estudio el sistema de prueba estándar propuesto en (Wood & Wollenberg, 1996), el cual consta de una planta termoeléctrica e hidroeléctrica equivalente y define a la ecuación (8) como la función objetivo a ser minimizada ya que representa la función de costo de combustible de la central térmica en dólares por hora:

$$F(P_T) = 0.00184 P_s^2 + 9.20 P_s + 575 \quad (8)$$

$$150 \leq P_s \leq 1500$$

Para el caso de la central hidroeléctrica, las características que definen la relación de generación de la central hidráulica con la descarga de agua se definen en (9) y (10):

$$q = 4.97 P_h + 330 \quad (9)$$

$$0 \leq P_h \leq 1000$$

$$q = 5300 + 12(P_h - 1000) + 0.05(P_h - 1000)^2 \quad (10)$$

$$1000 \leq P_h \leq 1100$$

Los resultados obtenidos para la solución de programación hidrotérmica empleando heurísticas se detallan en la Tabla 1 mostrando los costos totales obtenidos por diferentes autores según la técnica heurística utilizada para el mismo sistema de prueba detallado anteriormente.

Tabla 1. Comparación de resultados

Año	Autor	Algoritmo	Costo total (\$)
1991	Davis L.	GA (Davis, 1991)	709863.56
1994	Wong.K.P.et.al.	SA (Kit Po Wong & Wong, 1994)	709870.46
2003	Sinha.et.al.	IFEP (Sinha et al., 2003a)	709862.05
2005	Nallasivan.C.et.al.	Hybrid EP (Nallasivan et al., 2005)	703180.26
2006	Nidul Sinha.et.al	PSO (Sinha & Lai, 2006)	709862.048
2008	Chandrasekar Samudi.et.al	PSO (Samudi et al., 2008)	696002.30
2009	Farhat.et.al	BFA (Farhat & El-Hawary, 2009)	709837.926
2018	T.Balachander. et.al	FPA (Balachander et al., 2018)	693427.16
2020	Tehzeeb-ul-Hassan et.al	ABC (Tehzeeb-ul-Hassan et al., 2020)	693427.10

4. FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROBLEMA DE DESPACHO HIDRO-TÉRMICO-EÓLICO

La formulación del problema de despacho hidro-térmico-eólico básicamente toma como punto de partida la función objetivo (1) pero, además ahora se debe considerar la función de costo de los n -ésimos generadores eólicos, estableciéndose entonces la función objetivo de la siguiente manera:

$$C_T = C_{th} + C_w \quad (11)$$

De donde C_T representa el costo total de generación, C_{th} sería la función de costo de combustible de las N_s centrales térmicas y C_w representa el costo total unitario del viento para un conjunto de N_w unidades eólicas.

4.1 Costo de la energía eólica

El costo total del viento C_w considerando un conjunto de N_w unidades de generación eólicas para T periodos de tiempo se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

$$C_w = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_w} C_{di}(t) + C_{pi}(t) + C_{ri}(t) \quad (12)$$

De donde $C_{di}(t)$ corresponde al costo directo de la turbina eólica i en el periodo t ; mientras que $C_{pi}(t)$ y $C_{ri}(t)$ corresponden a los costos de la energía eólica de subestimación y sobreestimación respectivamente para cada turbina.

4.2 Restricciones adicionales

Tomando en cuenta que para la formulación del problema de despacho económico hidro-térmico-eólico existirá un conjunto de N unidades de generación, de las cuales existirá un conjunto de N_s centrales térmicas disponibles, N_h centrales hidroeléctricas y N_w aerogeneradores, entonces las restricciones iniciales planteadas sobre la capacidad operativa de las centrales termoeléctricas e hidráulicas se deben seguir cumpliendo, adicionalmente el balance de potencia ahora debe integrar la producción de las centrales eólicas tal como se indica en (13):

$$\sum_{i=1}^{N_s} P_{si} + \sum_{j=1}^{N_h} P_{hj} + \sum_{k=1}^{N_w} P_{wk} = P_L + P_{Lossj} \quad (13)$$

De donde el término P_{wk} corresponde a la potencia generada por cada turbina eólica. Adicionalmente, en el problema de despacho económico hidro-térmico-eólico debe existir reserva rodante por causa de la aleatoriedad que tiene la energía eólica para la producción de energía, entonces considerando que los aerogeneradores que forman parte del conjunto de N_w turbinas eólicas disponibles no proporcionan reservas de potencia, entonces se debe plantear el requerimiento de reserva rodante ascendente y descendente considerando las siguientes restricciones (Chen, 2007):

1) Restricciones de reserva rodante ascendente:

$$\sum_{i=1}^{N_s} R_{i+}^s(t) + \sum_{i=1}^{N_h} R_{i+}^h(t) \geq \alpha\% P_L(t) + \beta\% \sum_{i=1}^{N_w} P_{i+}^w(t) \quad (14)$$

$$R_{i+}^s(t) = \min\left(\left(P_{i,max}^s(t) - P_i^s(t)\right), A_{i,+}^s t_r\right) \quad (15)$$

$$P_{i,max}^s(t) = \min\left(P_{i,max}^s, P_i^s(t-1) + A_{i,+}^s \times \Delta t\right) \quad (16)$$

$$R_{i+}^h(t) = P_{i,max}^h - P_i^h(t) \quad (17)$$

2) Restricciones de reserva rodante descendente:

$$\sum_{i=1}^{N_s} R_{i-}^s(t) + \sum_{i=1}^{N_h} R_{i-}^h(t) \geq \gamma\% \sum_{i=1}^{N_w} (P_{i,max}^w - P_i^w(t)) \quad (18)$$

$$R_{i-}^s(t) = \min\left(\left(P_i^s(t) - P_{i,min}^s(t)\right), A_{i,-}^s t_r\right) \quad (19)$$

$$P_{i,min}^s(t) = \min\left(P_{i,min}^s, P_i^s(t-1) - A_{i,-}^s \times \Delta t\right) \quad (20)$$

$$R_{i-}^h(t) = P_i^h(t) - P_{i,min}^h \quad (21)$$

De donde el término t_r representa el tiempo de respuesta de la reserva rodante, Δt es la duración de un periodo, $\alpha\%$ representa el porcentaje de error del estudio de pronóstico de demanda, $\beta\%$ representa el porcentaje de error del pronóstico de energía eólica para reserva rodante ascendente, en cambio $\gamma\%$ representa el porcentaje de error del pronóstico de energía eólica para reserva rodante descendente; los términos $P_i^s(t)$, $P_i^h(t)$, $P_i^w(t)$ corresponden a la potencia entregada por las unidades de generación térmicas, hidráulicas y eólicas respectivamente. Los parámetros $R_{i+}^s(t)$ y $R_{i-}^s(t)$ corresponden a la capacidad de reserva rodante ascendente y descendente respectivamente de las centrales térmicas, $R_{i+}^h(t)$ y $R_{i-}^h(t)$ igualmente representan la capacidad de reserva rodante ascendente y descendente, pero para las centrales hidráulicas; $A_{i,+}^s$ y $A_{i,-}^s$ representan la tasa de aceleración y desaceleración respectivamente de las unidades térmicas.

Cabe mencionar que además de las últimas restricciones mostradas para ser consideradas en el problema de despacho económico hidro-térmico-eólico también se puede incluir otras condiciones como la incertidumbre en la predicción de los perfiles de viento y también se podría plantear al problema de optimización como multiobjetivo buscando minimizar los costos de combustibles y las emisiones producidas por las unidades térmicas.

5. DISCUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

El despacho económico como problema de optimización es una tarea que se la viene abordando desde diferentes aristas desde hace muchos años atrás, se lo sigue estudiando en la actualidad y seguirá siendo una problemática que debe ser analizada en el futuro dado el caso de su enorme importancia en la operación económica de los sistemas de potencia. De esta manera, resulta

imprescindible seguir innovando y mejorando las técnicas de solución a utilizarse para el problema de despacho hidrotérmico y la inclusión de otro tipo de energías renovables no convencionales. Puntualmente resulta interesante acotar que en la mayoría de trabajos donde se aplican métodos deterministas no se ha tomado en cuenta el efecto de punto de válvula en las funciones de costos de combustibles, el cual está ligado a la representación del aumento en el consumo de combustible como consecuencia de las maniobras que se realizan con las válvulas de admisión de vapor para regular la potencia entregada por las unidades térmicas y que hace que la función objetivo se convierta en una función de alta complejidad al alcanzar un carácter no convexo, no diferenciable y no uniforme; por otro lado, en referencia a las técnicas heurísticas y el mencionado efecto de punto de válvula, si bien existen trabajos que si lo han considerado, dado que la ventaja de las técnicas heurísticas como métodos exploratorios les permite considerar dicho efecto con mayor simplicidad, el modelo de despacho económico que formulan como tal varía en distintas maneras y se limita en ciertas condiciones como, por ejemplo: solo se utilizan sistemas equivalentes térmicos, el modelo de generación hidráulico toma en cuenta expresiones lineales para modelar la función de descarga de agua, o se utilizan funciones cuadráticas que solo dependen del caudal turbinado dejando a un lado el volumen de almacenamiento de los embalses. Otras restricciones que también se las deja a un lado incluyen los tiempos de retardo en el transporte de agua por las cuencas fluviales, en cuanto a las restricciones del sistema de potencia varios trabajos tienden a despreciar las pérdidas de potencia existentes en las líneas de transmisión, entre otras. Todo lo mencionado anteriormente encaja dentro del modelo de despacho económico que se formula para resolverse como problema de optimización, pero en cuanto con las técnicas heurísticas como métodos de solución, éstas desembocan nuevos desafíos y retos que por ende serán la motivación de trabajos futuros como, por ejemplo la hibridación de diferentes algoritmos heurísticos para abordar el mismo problema, también sería interesante y de gran contribución a la literatura científica que los investigadores sigan proponiendo mejoras o variaciones a los operadores propios de cada técnica heurística de manera que se logre mejorar el desempeño de estos métodos. Además, también como trabajos futuros sería valioso que los autores aprovechen el enorme catálogo de algoritmos heurísticos disponibles y lo adapten para la resolución del problema de despacho económico y así se pueda comparar los resultados conseguidos con los existentes que se han logrado a partir de algoritmos heurísticos tradicionales.

6. CONCLUSIÓN

La programación hidrotérmica a lo largo de los años ha venido siendo un problema de optimización en la que muchos investigadores se han enfocado en seguir buscando soluciones óptimas a partir de diferentes métodos ya sean los clásicos exactos o como en estas últimas décadas el empleo de técnicas heurísticas, las cuales han permitido abordar este problema referente a la operación económica de los sistemas de potencia con excelentes resultados y además brindando un amplio catálogo de algoritmos heurísticos desarrollados y probados con éxito para el problema de despacho económico hidrotérmico.

Las técnicas heurísticas a diferencia de los métodos deterministas han permitido sobrellevar de mejor manera y sin mucha dificultad las restricciones operativas que se definen en el planteamiento del modelo de optimización a resolver logrando principalmente conseguir resultados de alta calidad garantizando esquemas de despacho óptimo, y además brindando ventajas adicionales como metodologías más sencillas en las que prevalece un concepto simple en la estructuración del algoritmo de solución; también permiten reducir los tiempos de procesamiento computacional manteniendo una buena eficiencia y convergencia posicionando así a las técnicas heurísticas como métodos muy prácticos para seguir siendo estudiados e implementados.

En referencia al problema de despacho económico hidro-térmico-eólico, la cantidad de trabajos existentes en comparación con los disponibles sobre programación hidrotérmica

evidentemente son menores debido a que el problema de optimización involucra más condiciones y restricciones a ser tomadas en cuenta para el planteamiento del problema; sin embargo, los resultados obtenidos por varios autores con el uso de técnicas heurísticas como métodos de solución también son de alta calidad y promueven a seguir empleando este tipo de técnicas en el problema de despacho económico hidrotérmico considerando además energía eólica.

REFERENCIAS

- Bai, X., & Shahidehpour, S. M. (1996). Hydro-thermal scheduling by Tabu Search and Decomposition Method. *IEEE Transactions on Power Systems*, 11(2), 968–974.
- Balachander, T., Jeyanthi, P. A., & Devaraj, D. (2018). Short term hydro thermal scheduling using flower pollination algorithm. *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing, INCOS 2017, 2018-Febru*, 1–5.
<https://doi.org/10.1109/ITCOSP.2017.8303162>
- Banerjee, S., Dasgupta, K., & Chanda, C. K. (2016). Short term hydro-wind-thermal scheduling based on particle swarm optimization technique. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 81, 275–288.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.01.031>
- Chang, G. W., Aganagic, M., Waight, J. G., Medina, J., Burton, T., Reeves, S., & Christoforidis, M. (2001). Experiences With Mixed Integer Linear Programming Based Approaches on Short-Term Hydro Scheduling. *IEEE Transactions on Power Systems*, 16(4), 743–749.
- Chen, C. L. (2007). Simulated annealing-based optimal wind-thermal coordination scheduling. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 1(3), 447–455. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd:20060208>
- Conejo, A. J., Arroyo, J. M., Contreras, J., & Villamor, F. A. (2002). Self-scheduling of a hydro producer in a pool-based electricity market. *IEEE Transactions on Power Systems*, 17(4), 1265–1271.
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2002.804951>
- Davis, L. (1991). *Handbook of genetic algorithms*. Van Nostrand Reinhold.
- De Queiroz, A. R. (2016). Stochastic hydro-thermal scheduling optimization: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 382–395. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.065>
- Dubey, H. M., Pandit, M., & Panigrahi, B. K. (2015). Hybrid flower pollination algorithm with time-varying fuzzy selection mechanism for wind integrated multi-objective dynamic economic dispatch. *Renewable Energy*, 83, 188–202. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.034>
- Dubey, H. M., Pandit, M., & Panigrahi, B. K. (2016). Ant lion optimization for short-term wind integrated hydrothermal power generation scheduling. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 83, 158–174. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.03.057>
- Farhat, I. A., & El-Hawary, M. E. (2009). *Short-Term Hydro-Thermal Scheduling Using an Improved Bacterial Foraging Algorithm*. 1–5.
- Gil, E., & Araya, J. (2016). Short-term Hydrothermal Generation Scheduling Using a Parallelized Stochastic Mixed-integer Linear Programming Algorithm. *Energy Procedia*, 87, 77–84.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.360>
- Gil, E., Bustos, J., & Rudnick, H. (2003). Short-Term Hydrothermal Generation Scheduling Model Using a Genetic Algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, 18(4), 1256–1264.
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2003.819877>
- Hincapié Isaza, R., Gallego Rendón, R., & Ríos Porras, C. (2004). Técnicas Heurísticas Aplicadas Al Problema Del Cartero Viajante (Tsp). *Técnicas Heurísticas Aplicadas Al Problema Del Cartero Viajante (Tsp)*, 1(24), 1–6.
<https://doi.org/10.22517/23447214.7279>
- Homem-De-Mello, T., De Matos, V. L., & Finardi, E. C. (2011). Sampling strategies and stopping criteria for stochastic dual dynamic programming: A case study in long-term hydrothermal scheduling. *Energy Systems*, 2(1), 1–31.
<https://doi.org/10.1007/s12667-011-0024-y>
- Jian, J., Pan, S., & Yang, L. (2019). Solution for short-term hydrothermal scheduling with a logarithmic size mixed-integer linear programming formulation. *Energy*, 171, 770–784. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.038>
- Kumar, V. S., & Mohan, M. R. (2011). A genetic algorithm solution to the optimal short-term hydrothermal scheduling. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 33(4), 827–835.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2010.11.008>
- Marwali, M. K. C., & Shahidehpour, S. M. (2000). Coordination between long-term and short-term generation scheduling with network constraints. *IEEE Transactions on Power Systems*, 15(3), 1161–1167.

<https://doi.org/10.1109/59.871749>

- Nallasivan, C., Suman, D. S., Henry, J., & Ravichandran, S. (2005). A novel approach for short-term hydrothermal scheduling using hybrid technique. *2006 IEEE Power India Conference, 2005*, 703–707. <https://doi.org/10.1109/POWERI.2006.1632593>
- Nayak, N. C., & Rajan, C. C. A. (2012). Hydro-Thermal Scheduling by a Hybrid Evolutionary Programming - Tabu Search Method with Cooling - Banking Constraints. *2012 International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies [ICCEET]*, 98–103.
- Nazari-Heris, M., Mohammadi-Ivatloo, B., & B. Gharehpetian, G. (2017). Short-term scheduling of hydro-based power plants considering application of heuristic algorithms: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74(February), 116–129. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.043>
- Salam, M. S., Nor, K. M., & Hamdan, A. R. (1998). Hydrothermal scheduling based lagrangian relaxation approach to hydrothermal coordination. *IEEE Transactions on Power Systems*, 13(1), 226–235. <https://doi.org/10.1109/59.651640>
- Samudi, C., Das, G. P., Ojha, P. C., Sreeni, T. S., & Cherian, S. (2008). Hydro thermal scheduling using particle swarm optimization. *Transmission and Distribution Exposition Conference: 2008 IEEE PES Powering Toward the Future, PIMS 2008*, 3–7. <https://doi.org/10.1109/TDC.2008.4517221>
- Sinha, N., Chakrabarti, R., & Chattopadhyay, P. K. (2003a). Fast evolutionary programming techniques for short-term hydrothermal scheduling. *Electric Power Systems Research*, 66(2), 97–103. [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(03\)00016-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(03)00016-6)
- Sinha, N., Chakrabarti, R., & Chattopadhyay, P. K. (2003b). Fast Evolutionary Programming Techniques for Short-Term Hydrothermal Scheduling. *IEEE Transactions on Power Systems*, 18(1), 214–220. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2002.807053>
- Sinha, N., & Lai, L. L. (2006). Meta heuristic search algorithms for short-term hydrothermal scheduling. *Proceedings of the 2006 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2006*(August), 4050–4056. <https://doi.org/10.1109/ICMLC.2006.258860>
- Siqueira, T. G., Zambelli, M., Cicogna, M., Andrade, M., & Soares, S. (2006). Stochastic dynamic programming for long term hydrothermal scheduling considering different streamflow models. *2006 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, PMAPS*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/PMAPS.2006.360203>
- Tehzeeb-ul-Hassan, Alquthami, T., Butt, S. E., Tahir, M. F., & Mehmood, K. (2020). Short-term optimal scheduling of hydro-thermal power plants using artificial bee colony algorithm. *Energy Reports*, 6, 984–992. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.04.003>
- Tovey, C. A. (2018). Nature-Inspired Heuristics : Overview and Critique. *INFORMS TutORials in Operations Research, October*.
- Wong, K. P., & Wong, Y. W. (1994). Short-term hydrothermal scheduling. Part I: Simulated annealing approach. *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, 141(5), 497–501. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19941350>
- Wong, Kit Po, & Wong, Y. W. (1994). Short-term hydrothermal scheduling with reservoir volume constraints. Part II: Parallel simulated annealing approach. *IEE Conference Publication*, 2(388), 559–564.
- Wood, A. J., & Wollenberg, B. F. (1996). *Power Generation, Operation and control* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Wu, Y. G., Ho, C. Y., & Wang, D. Y. (2000). A diploid genetic approach to short-term scheduling of hydro-thermal system. *IEEE Transactions on Power Systems*, 15(4), 1268–1274. <https://doi.org/10.1109/59.898100>
- Yin Wa Wong, S. (2001). Hybrid simulated annealing/genetic algorithm approach to short-term hydro-thermal scheduling with multiple thermal plants. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 23(7), 565–575. [https://doi.org/10.1016/S0142-0615\(00\)00029-6](https://doi.org/10.1016/S0142-0615(00)00029-6)
- Yuan, X., Tian, H., Yuan, Y., Huang, Y., & Ikram, R. M. (2015). An extended NSGA-III for solution multi-objective hydro-thermal-wind scheduling considering wind power cost. *Energy Conversion and Management*, 96, 568–578. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.03.009>
- Zaghloul, M. F., & Trutt, F. C. (1988). Efficient methods for optimal scheduling of fixed head hydrothermal power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 3(1), 24–30. <https://doi.org/10.1109/59.43176>