

Despacho Económico de Unidades Térmicas con Funciones Lineales de Costo utilizando el Algoritmo de la Luciérnaga

Oscullo, José^{1,*} ; Pilaquinga, Santiago¹ 

¹Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador

Resumen: Este artículo muestra el despacho de las unidades térmicas presentes en un sistema hidrotérmico por medio del uso del algoritmo de optimización que utiliza la inteligencia de las luciérnagas. Si bien el problema de despacho de las unidades térmicas ha sido tratado en otros trabajos, en el presente estudio se considera como función objetivo del despacho de las unidades térmicas mediante su costo de producción lineal con la consideración de restricciones binarias. El algoritmo de las luciérnagas ha probado tener una alta capacidad de optimización para determinar un punto óptimo en base a características de comportamiento de la naturaleza como los algoritmos genéticos, más se diferencia por la capacidad de ajustes pequeños cerca de la solución. El algoritmo de la luciérnaga se constituye en una herramienta heurística adicional para resolver este tipo de problemas de los métodos clásicos. Mediante la representación de un enjambre de luciérnagas cuya función objetivo es determinar la mayor intensidad luminosa en el punto de éste permite modificar la velocidad de convergencia siendo más rápida mientras más lejos esté de la solución. La metodología propuesta se implementa en Matlab y para mostrar su capacidad se la aplica al Sistema Nacional Interconectado (SNI) determinando el despacho económico de las unidades térmicas para días laborables, fines de semana y feriados.

Palabras clave: Despacho de generación, unidades térmicas, algoritmo de libélula, algoritmos heurísticos, inteligencia de enjambre.

Economic Dispatch of Thermal Units with Linear Cost Functions using Firefly Algorithm

Abstract: This paper shows economic dispatch of thermal units of a real hydrothermal system using the firefly algorithm. Although the problem of dispatch of thermal units has been dealt in other research, in the present study it is considered as an objective function of dispatch of thermal units through their linear production cost with the consideration of binary constraints. The firefly algorithm has proven to have a high optimization capacity to determine an optimal point based on behavioral characteristics of nature such as genetic algorithms, but it is differentiated by the ability to make small adjustments near the solution. The firefly algorithm is implemented as an alternative solution due to that the mathematics classic methods present limitations in searching of the optimal solution for this kind of problems. The firefly swarm algorithm associates the objective function with light intensity, this property based in the brightness modifies the behavior of fireflies and makes possible a more rapid convergence towards global solutions. The proposed methodology is implemented in Matlab and its performance is evaluated using the National Interconnected System of Ecuador (SNI) to determine the economic load dispatch of thermal units on weekdays, weekends and holidays.

Keywords: Power generation dispatch, thermal units, firefly algorithm, heuristic algorithms, swarm intelligence.

1. INTRODUCCIÓN

Los métodos de optimización inspirados en cualidades de la naturaleza han sido utilizados en la resolución de problemas de ingeniería, a través de modelos que representan el sistema analizado, estos modelos presentan de manera general una combinación de variables no lineales (Yang, 2010). Por medio de las cuales se puede optimizar los recursos del sistema en base al cumplimiento de un objetivo y observando las restricciones de cada elemento del mismo, a diferencia de los

métodos matemáticos convencionales, estos permiten considerar las restricciones dadas por las características operativas y físicas de cada uno de los elementos del sistema donde se encuentran las no-linealidades y discontinuidades de las cuales no es posible determinar una relación matemática explícita (Wood, 1996).

Esta característica de los métodos heurísticos ha permitido su utilización en sistemas físicos como: mecánicos, hidráulicos, eléctricos, etc., cuyas relaciones físicas son muy complejas de

*jose.oscullo@epn.edu.ec
Recibido: 03/06/2019
Aceptado: 12/04/2022
Publicado en línea: 25/05/2022
10.33333/rp.vol50n1.04
CC 4.0

modelar matemáticamente y se caracterizan por presentar varios factores de operación es decir; la función a optimizar muestra una alta no linealidad, es en este escenario que los métodos de optimización heurística basado en el comportamiento de individuos de la naturaleza ha demostrado ser una técnica eficiente y superando en muchos casos a otras técnicas heurísticas (Yang, 2014).

Así, los algoritmos de optimización heurísticos de enjambre inspirados en el comportamiento natural de especies como aves, insectos, peces, etc., basan la búsqueda de la solución en tres reglas de interacción: (i) moverse en la misma dirección que su vecino, (ii) permanecer cerca de su vecino y (iii) evitar la colisión con el mismo. Por medio de estas reglas los individuos forman aglomeraciones en puntos específicos, en especial donde se hallan los recursos requeridos por la mayoría del grupo. Mediante las características indicadas, el algoritmo de enjambre basado en el comportamiento de las luciérnagas busca aprovechar la aglomeración del grupo de individuos para determinar la solución del problema, este esquema de búsqueda heurística se basa en el nivel de atracción dado por la luminosidad de cada individuo dentro de un grupo particular (Yang, 2014; Banabeau, 1999).

Un sistema hidrotérmico conformado por generadores hidráulicos y térmicos para determinar su despacho de las unidades disponibles se constituye en un problema de grande porte, en el cual es necesario considerar un elevado conjunto de variables tales como: la disponibilidad de las fuentes primarias de producción de energía, las restricciones operativas de las centrales hidroeléctricas y unidades de generación térmica por lo que al mismo se lo trata separando el problema en un despacho hidroeléctrico y un despacho de las unidades térmicas que están adecuadamente sincronizados para abastecer la demanda en cada periodo de análisis (Wood, 1996).

Dada la particularidad de que las unidades térmicas en un sistema hidrotérmico, por lo general, son el mayor número de unidades del sistema a pesar de que su capacidad sea menor, esto unido a la característica de que son el complemento en el despacho cumpliendo sus características económicas, operativas propias y operativas del sistema, han permitido modelarlo y aplicar diferentes técnicas matemáticas y heurísticas las cuales se han caracterizado por considerar la función objetivo del despacho de las unidades térmicas mediante funciones cuadráticas o cúbicas que permiten determinar la operación de las mismas en cada periodo de análisis al menor costo de producción para el sistema hidrotérmico (Conejo, 2010).

Más, cuando los costos de producción de las unidades térmicas son lineales, como sucede en algunos sistemas hidrotérmicos, como es el caso del sistema eléctrico ecuatoriano, los programas comerciales o la aplicación de técnicas deben ser adaptadas a fin de obtener el despacho de las unidades térmicas la cual no garantiza que sea la del menor costo de producción posible; si bien están consideradas las restricciones operativas.

Debido a esta situación y gracias a que el algoritmo de enjambre basado en el comportamiento de las luciérnagas, que por un lado, permite considerar una función objetivo

polinómica de cualquier grado, representar las restricciones no lineales y aplicarle a un elevado conjunto de individuos se constituye en una herramienta que permita resolver el despacho de las unidades térmicas en un sistema hidrotérmico, considerando que abastecerá la demanda remanente dado por condiciones operativas de la red eléctrica o económicas del despacho (Kennedy, 2001).

Este estudio presenta la factibilidad de utilizar el algoritmo de enjambre basado en el comportamiento de las luciérnagas para el despacho de las unidades térmicas y abastecer una demanda dada, considerando lo siguiente: costo lineal de producción, disponibilidad de la unidad, tiempo mínimo y máximo de operación. Su aplicación se la realizará al despacho de días laborables, fines de semana y feriados del sistema hidrotérmico ecuatoriano, comparándolo con los despachos obtenidos por el Operador Nacional de Electricidad CENACE.

2. FORMULACIÓN MATEMÁTICA

El despacho económico de las unidades térmicas tiene como objetivo minimizar el costo total de producción de energía eléctrica de las unidades térmicas participantes, las cuales deben operar dentro de sus límites de generación y en conjunto satisfacer la demanda del sistema más las pérdidas (Wood, 1996).

Tradicionalmente, el despacho económico de unidades térmicas en un sistema de potencia se ha modelado utilizando el costo de producción de generación de cada unidad, representado por funciones polinómicas cuadrática o cúbica, a través del cual determinar el costo para cada nivel de potencia. Para su solución se emplean técnicas de optimización deterministas como: punto interior, método de gradiente, método de Newton, programación dinámica entre otras (Yang, 2014).

Los programas comerciales y estudios utilizan esta función de costos para el despacho económico. Sin embargo, la generalidad de modelos aplicados en sistemas hidrotérmicos utiliza por facilidad de optimización ecuaciones polinómicas de segundo orden para representar el costo de producción de energía eléctrica de las unidades térmicas en lugar de ecuaciones lineales. Es así que, el costo de operación de cada unidad C_g^P , representa la relación entre la potencia de salida P_{gt} en el instante de tiempo t y su costo variable de producción CV_g , en la hora t [6]. Matemáticamente, el costo de operación de una unidad generadora térmica se expresa como en la ecuación (1):

$$C_g^P = CV_g \cdot P_{gt} \quad (1)$$

Así, el costo de producción del parque de generadores térmicos N_G , para un instante de tiempo t se expresa matemáticamente como en la ecuación (2):

$$C_t = \sum_g \sum_{g=1}^{N_G} C_g^P(P_{gt}) \quad (2)$$

Cuando la función de costo de generación de las unidades térmicas se representa mediante la ecuación (2), por un lado, no es posible aplicar las técnicas matemáticas convencionales

debido a que un costo de generación lineal representa un costo incremental operacional constante y por otro, si se selecciona la unidad térmica al despacho esta va a operar en su potencia máxima o mínima a fin de que permita cumplir las restricciones de: abastecimiento de la demanda, los límites de generación y los tiempos de operación. Estas características hacen que el problema de despacho de unidades térmicas presente no-linealidades como se muestra en las ecuaciones (3) a (6). (Wood, 1996; Yang, 2014).

$$\text{Min } C_t$$

sujeta a:

$$\sum_{g=1}^{N_G} P_{g,t} = D_t \quad (3)$$

$$(T_{g,t-1}^{enc} - T_{\min enc g})(E_{g,t-1} - E_{g,t}) \geq 0 \quad \forall g, \forall t \quad (4)$$

$$(T_{g,t-1}^{ap} - T_{\min ap g})(E_{g,t} - E_{g,t-1}) \geq 0 \quad \forall g, \forall t \quad (5)$$

$$P_g^{min} \leq P_g \leq P_g^{max} \quad \forall g \quad (6)$$

Donde:

C_t : Costo total de operación en la hora t en \$.

D_t : Demanda térmica total en la hora t en MW.

$P_{g,t}$: Potencia despachada la unidad térmica g en la hora t en MW.

N_G : Número total de generadores térmicos.

P_g^{min} : Potencia mínima del generador g.

P_g^{max} : Potencia máxima del generador g.

$T_{g,t-1}^{enc}$: Tiempo de funcionamiento de la unidad térmica g en la hora t-1.

$T_{g,t-1}^{ap}$: Tiempo de apagado de la unidad térmica g en la hora t-1.

$T_{\min enc g}$: Tiempo mínimo de funcionamiento de la unidad térmica g.

$T_{\min ap g}$: Tiempo mínimo de apagado de la unidad térmica g.

$E_{g,t}$: Estado de la unidad g en la hora t (encendida = 1, apagada = 0).

Para esta clase de problemas los algoritmos de enjambre utilizados como método de optimización busca la solución a pesar de la existencia de múltiples, máximos o mínimos en el espacio de búsqueda. A diferencia de los métodos tradicionales, estos realizan una búsqueda extensa dentro del espacio de solución, encontrando una óptima respuesta (Yang, 2014).

Los sistemas basados en la inteligencia de enjambre para la optimización del problema se basa en el comportamiento del enjambre de partículas (abejas, bacterias, pájaros, etc.) se componen de una población de agentes que siguen reglas simples y fijas para interactuar entre sí dentro de su entorno, de tal forma aunque sus individuos sean ignorantes de su naturaleza, el comportamiento colectivo conduce a un comportamiento global inteligente, mediante el cual la búsqueda de la solución se basa en tres reglas de interacción: (i) moverse en la misma dirección que su vecino, (ii) permanecer cerca de su vecino y (iii) evitar la colisión con el mismo (Azad, 2011; Basu, 2011; Apostolopoulos, 2011; Yang, 2009).

El algoritmo de luciérnaga publicado por primera vez en 2008 (Yang, 2009) representa un método heurístico efectivo para problemas de optimización, su comportamiento basado en la inteligencia de enjambre y la atracción por la intensidad de luz,

permite encontrar la mejor solución global. Debido a su efectividad ha sido utilizado para resolver problemas con alta no linealidad como el despacho de unidades térmicas, pero se consideró funciones de costo de producción de generación cuadráticas (Swarnkar, 2012).

En particular, aunque el algoritmo de la luciérnaga presenta similitudes con otros algoritmos heurísticos es más simple en el concepto y la aplicación. Las características principales del algoritmo son la atracción β y el movimiento guiado debido a la intensidad luminosa, las cuales permiten al algoritmo encontrar la solución óptima. La atracción luminosa es proporcional a la intensidad de luz observada por las demás luciérnagas y disminuye con la distancia desde su punto de emisión hasta el punto donde se encuentra ubicado el observador, así como varía significativamente por el grado de absorción de la luz del entorno, como se indica en la ecuación (7) (Azad, 2011; Banabeau, 1999; Lukasik, 2009).

$$I(r) = I_{fuente} e^{-\gamma r^2} \quad (7)$$

Donde:

r : Distancia entre dos luciérnagas

γ : Coeficiente de absorción de luz

I_{fuente} : Intensidad de la fuente

$I(r)$: Intensidad observada

La atracción es una función monótonamente decreciente, que se expresa como lo establece la ecuación (8) (Bin, 2013).

$$\beta(r) = \beta_{min} + (\beta_0 - \beta_{min}) \cdot e^{-\gamma r^2} \quad (8)$$

Donde:

β_0 : Atracción inicial en $r=0$.

β_{min} : Mínimo valor de β .

La distancia entre dos luciérnagas i y j son respectivamente \mathbf{x}_i y \mathbf{x}_j , se representa matemáticamente como la distancia cartesiana como lo indica la ecuación (9) (Bin, 2013).

$$r_{ij} = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (9)$$

Donde:

$x_{i,k}$: posición de la luciérnaga i respecto a la luciérnaga k

$x_{j,k}$: posición de la luciérnaga j respecto a la luciérnaga k

d : Número de luciérnagas en la iteración

En el caso de dos luciérnagas, cuando la luciérnaga j es más brillante que la luciérnaga i , la luciérnaga i se moverá hacia la luciérnaga j , este movimiento determina la nueva posición, mediante la ecuación (10), se representa matemáticamente esta situación. (Bin, 2013; Waqar, 2016).

$$\mathbf{x}_i^{nueva} = \mathbf{x}_i^{antigua} + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i^{antigua}) + \varepsilon_i^{antigua} \quad (10)$$

Donde:

ε_i : Número aleatorio de una distribución uniforme $[-1,1]$.

β_0 : Nivel de atracción inicial en $r = 0$.

γ : Coeficiente de absorción de luz.

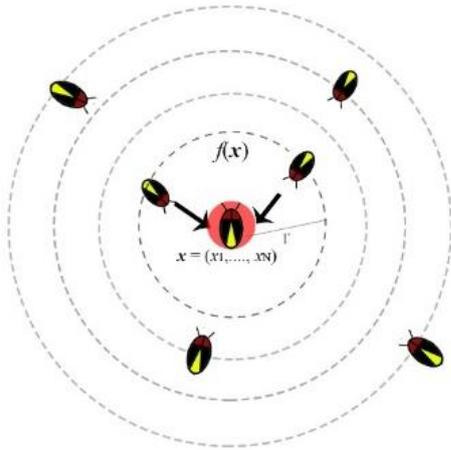


Figura 1. Atracción de las luciérnagas hacia la más brillante

El primer término de la ecuación (10) representa la posición inicial de la luciérnaga i , el segundo término representa la atracción de la luciérnaga i hacia la luciérnaga j y el tercer término representa el movimiento aleatorio de la luciérnaga i . En la Figura 1, se presenta la esquematización de la atracción de las luciérnagas hacia la luciérnaga más brillante.

3. METODOLOGÍA PROPUESTA

El problema de despacho a solucionar es el planteado en las ecuaciones (3) a (6), como se indicó el algoritmo de luciérnaga se caracteriza por presentar una heurística que facilita la búsqueda de la solución para problemas donde se presentan funciones de optimización polinómicas con restricciones enteras, lineales y no lineales encontrando soluciones satisfactorias en tiempos de cálculo razonables.

El algoritmo parte de una población inicial de luciérnagas x_i , $i=1,2, \dots, N_L$ y mediante números aleatorios determina la localización, que para el caso del despacho se constituyen en las potencias en la hora t y defino los parámetros $\beta_0, \beta_{min}, \gamma$, con los cuales evaluó la función objetivo que determina la intensidad de la solución. En el presente trabajo, se plantea una propuesta que se esquematiza en el pseudo código de la Figura 2, a fin de establecer las etapas propuestas para obtener el despacho diario de las unidades térmicas en un sistema hidrotérmico. La demanda a abastecer por las unidades térmicas constituye la demanda remanente entre la demanda total más las pérdidas del sistema y la producción de generación de las centrales hidroeléctricas y de las de energía renovable.

En cada iteración, existe una luciérnaga que tiene una mayor intensidad de brillo respecto a las demás, no necesariamente la misma, generando una atracción hacia las luciérnagas adyacentes las cuales modifican su posición para acercarse a ella. La luciérnaga más brillante de todas, a su vez se moverá aleatoriamente en búsqueda de la solución óptima, así, mediante un proceso iterativo se va a presentar una aglomeración de luciérnagas en la solución que satisface todas las restricciones de la función objetivo del problema analizado.

Es necesario tener cuidado con el valor del número aleatorio ϵ el cual debe ir decreciendo con el número de iteraciones; debido a que si es muy grande puede alejar de la solución para lo cual, se plantea que el mismo esté afectado por un parámetro α que decrezca con el número de iteraciones y debe estar en el rango de (0,1) como lo plantea Waqar (2016) en la ecuación (11).

```

Inicialización de parámetros
Algoritmo:  $\gamma, \beta_0$ , Iteraciones,
Unidades Térmicas:  $P_g^{min}, P_g^{max}, CV_g, D_T$ 

Iniciar el número de luciérnagas: NL

For t = 1 a 24

    Evaluar la intensidad de luz del conjunto de luciérnagas:
         $I(P,t) = \sum_t \sum_{g=1}^{NG} C_g^p (P_{gt})$ 
    Analizar las restricciones del problema.

    While (t < Iteraciones)
        For i = 1: NL
            For j = 1 : NL
                If (  $I_i < I_j$  )
                    Evaluar la distancia de las luciérnagas con la
                    ecuación (9)
                    Determinar las nuevas posiciones con la ecuación
                    (10).
                End
            End
            Evaluar la intensidad de luz
        End

        Clasificar las luciérnagas y ordenarlas acorde a la mejor
        solución.
        Analizar las restricciones del problema
    End
    Determinar la mejor luciérnaga
End
Fin del algoritmo

Salidas: Presentar el costo del despacho y las  $P_g$ 
    
```

Figura 2. Pseudo código de la Metodología Propuesta

$$\alpha_{nueva} = \alpha_{antigua} \left[1 - \left\{ 1 - \left(\frac{10^{-4}}{9} \right)^{\frac{1}{N_{iteraciones}}} \right\} \right] \quad (11)$$

4. APLICACIÓN AL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO

El sistema hidrotérmico ecuatoriano es denominado como Sistema Nacional Interconectado, al año 2017 presenta una demanda de 23903,10 GWh de los cuales el 85,04% fue producido por centrales hidroeléctricas, el 1,69% de fuentes energía renovable, el 0,08% de las interconexiones con Colombia y Perú. Es decir, el 13,19% de la energía que permitió abastecer la demanda del 2017 proviene de 119 unidades de generación térmica basado en tecnologías de: turbo vapor, gas, diésel y motores de combustión interna.

Los despachos considerados para ver la respuesta del algoritmo de luciérnagas implementado en el software Matlab R2017a y los resultados obtenidos en una hoja de Excel 2013, corresponden a los despachos para: día laborable, sábado, domingo y un feriado a fin de poder determinar el menor costo de producción para abastecer la demanda asignada a las

Tabla 1. Despacho de Unidades Térmicas del SNI

	Día laborable 22/03/2017	Sábado 18/03/2017	Domingo 19/03/2017	Feriado 26/02/2017
Demanda (MWh)	10292,23	10841,43	9808,30	9467,03
Unidades despachadas	19	25	22	17
No. Luciérnagas	50	50	50	50
Iteraciones	440	500	350	450
Alfa (α)	0,8	0,8	0,8	0,8
Beta (β)	0,02	0,02	0,02	0,02
Gamma (γ)	1	1	1	1
Tiempo (s)	130	160	100	150
[USD] _{Luciérnaga}	42313,728	50249,326	40748,854	38178,483
[USD] _{CENACE}	42333,957	50642,961	40805,079	38190,346

Fuente: En base a datos de CENACE.

unidades térmicas. El mismo es comparado con el despacho obtenido para cada uno de los días respectivos por el Operador Nacional de Electricidad CENACE (CENACE, 2018), en el programa de despacho NCP desarrollado por PSR (PSR, 2018), el cual basa la solución del problema de despacho mediante programación dinámica, como se observa en la Tabla 1.

En las simulaciones se determinó que el número óptimo de luciérnagas que permiten resolver el problema de optimización corresponde a 50, es decir; existen 50 individuos que buscan la solución mediante la combinación de las unidades térmicas disponibles del total de unidades térmicas que posee el SNI.

La demanda a ser abastecida por las unidades térmicas es semejante de lunes a sábado y varía los días domingo y feriado. Como se muestra en la Tabla 1, el número de iteraciones es mayor en los días que se presenta un consumo mayor en el horario de demanda máxima, comparado al consumo de los otros períodos. Ya que esta demanda máxima requiere el ingreso de un mayor número de unidades para mantener el equilibrio oferta-demanda y observando la restricción de encendido y apagado de las unidades que en los otros períodos de consumo.

Si bien el número de unidades despachadas en los dos casos es el mismo, en todos los despachos de los días analizados se determina un costo inferior promedio para los despachos analizados de 0,25%, lo cual muestra el potencial del uso de este método de optimización heurística.

A continuación, se presenta la convergencia para el despacho del periodo de máxima demanda (19:00 a 20:00) del día sábado; en la Figura 3, se observa la convergencia cuando se varía únicamente el número de luciérnagas, donde se observa que para resolver una hora del despacho es conveniente 10 luciérnagas; más debido a las restricciones y al intervalo de despacho de 24 horas con la finalidad de alcanzar la convergencia en periodos de tiempo razonables se colocó 50 luciérnagas. Sin embargo, esto determina la necesidad de incrementar el número de iteraciones.

En la Figura 4, se muestra que a partir de un cierto número de iteraciones el costo no disminuye, es decir, se alcanzó el costo óptimo de la función objetivo. Y el número de iteraciones disminuye considerablemente cuando se incrementa el número

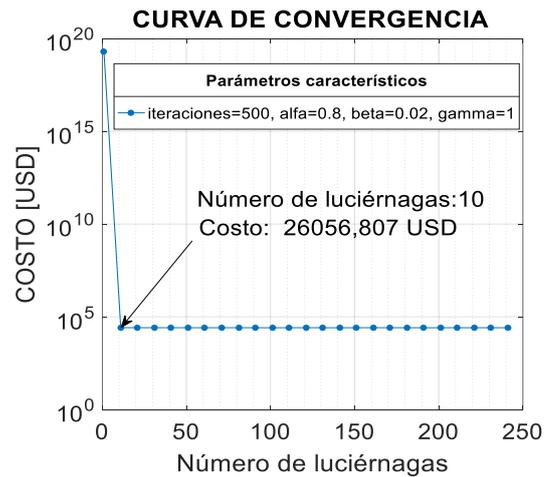


Figura 3. Variación del Número de Luciérnagas en la hora de demanda máxima del día sábado

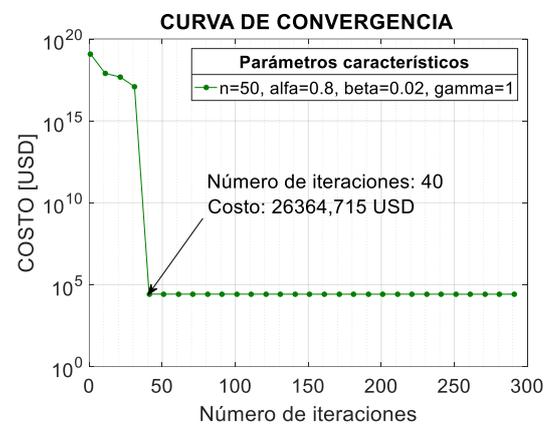


Figura 4. Variación del Número de Iteraciones en la hora de demanda máxima del día sábado

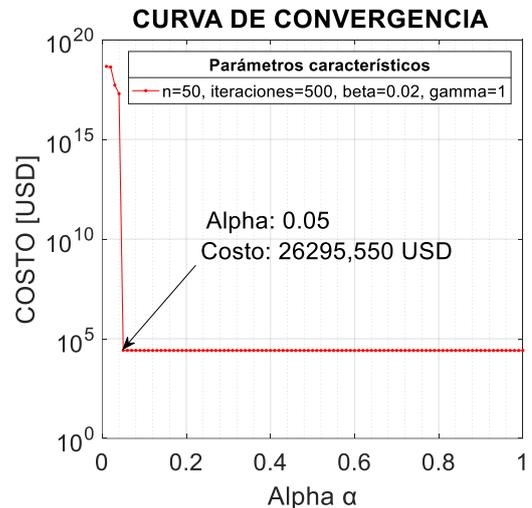


Figura 5. Variación de α en la hora de demanda máxima del día sábado

de luciérnagas para la búsqueda de la solución óptima; para el análisis de la demanda máxima se requiere de 40 iteraciones con 50 luciérnagas, comparadas con las 500 iteraciones requeridas de la Figura 3.

En las figuras siguientes, resulta interesante analizar la variación de los parámetros. En la Figura 5, se presenta la variación de α , a fin de observar su impacto se utilizó 500

iteraciones el valor menor a fin de alcanzar convergencia en tiempos razonables fue de 0,05.

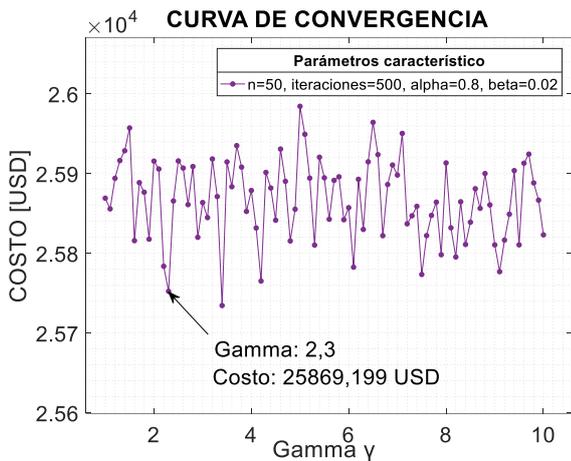


Figura 6. Variación de γ en la hora de demanda máxima del día sábado

En la Figura 6, se observa que la variación del coeficiente de absorción de luz de luciérnagas es el más sensible, ya que mediante el cual se discierne si la solución encontrada es el valor óptimo y con ello todas las luciérnagas van hacia el foco de luz que representa la solución.

La variación de los parámetros en la búsqueda de solución del algoritmo de las luciérnagas, muestra que tienden a la solución óptima que, en este caso, es el costo de operación de las unidades térmicas para abastecer la demanda.

5. CONCLUSIONES

El algoritmo heurístico basado en el comportamiento de las luciérnagas, aplicado al despacho de unidades térmicas de un sistema real ha demostrado su potencial de aplicación al obtener el despacho de mínimo costo observando las restricciones planteadas del problema y considerando como función objetivo la curva lineal de costos.

Los parámetros del modelo, si bien presentan variaciones en la convergencia en algunos casos de manera acelerada muestran que tienden a ubicar el óptimo global para cada hora del despacho y en global alcanzar el menor costo de operación del despacho diario. Mediante simulaciones se determina que el número adecuado de luciérnagas corresponde a las 50.

El problema analizado muestra que el algoritmo heurístico basado en el comportamiento de las luciérnagas, se comporta adecuadamente para obtener el despacho diario para satisfacer la demanda, se sugiere ampliar el estudio del mismo considerando la red eléctrica a fin de incluir las restricciones de calidad y seguridad de energía que en la práctica debe observar el mismo. Adicional es necesario analizar la aplicación del algoritmo al problema de coordinación hidrotérmica a fin de optimizar el despacho global de las centrales hidroeléctricas y de energía renovable lo cual permita ver el potencial del algoritmo, para lo cual se hace necesario observar la inclusión de las restricciones de cada elemento adicional a ser considerado y del tratamiento de la función objetivo.

REFERENCIAS

- Apostolopoulos, T., y Vlachos, A. (2011). Application of the Firefly Algorithm for Solving the Economic Emissions Load Dispatch Problem, *International Journal Combination*, vol. 2011, pp. 1–23. <https://doi.org/10.1155/2011/523806>
- Azad, A. (2011). Optimum Design of Structures Using an Improved Firefly Algorithm, *International Journal Optimization Civil Engineering*, vol. 1(2), pp. 327–340.
- Banabeau, E., Dorigo, M., y Theraulaz, G. (1999). *Swarm Intelligence from Natural to Artificial Systems*, 1st ed. New York: Oxford University Press.
- Basu, B., y Mahanti, G. (2011). Firefly and Artificial Bees Colony Algorithm for Synthesis of Scanned and Broadside Linear Array Antenna, *Prog. Electromagn. Res. B*, vol. 32, no. July, pp. 169–190. doi:10.2528/PIERB11053108
- Bin Mo, Ma, Y., y Zheng, Q. (2013). Optimal Choice of Parameters for Firefly Algorithm, *Proceedings - 2013 4th Int. Conf. Digit. Manuf. Autom. ICDMA 2013*, pp. 887–892.
- Conejo, A., Carrión, M., y Morales, J. (2010). *Decision Making Under Uncertainty in Electricity Markets*, 1st ed. New York: Springer Science.
- Kennedy, J., y Eberhart, R. (2001). *Swarm Intelligence*, 1st ed. San Francisco: Academic Press.
- Lukasik, S., y Zak, S. (2009). Firefly algorithm for continuous constrained optimization tasks, *Proceedings International Conference Computation Intelligence (ICCCI '09)*, vol. 5796, pp. 97–106.
- Operador Nacional de Electricidad (n.d.). Información sobre la operación del SNI, Obtenido de: <http://www.cenace.org.ec> (octubre, 2018).
- PSR (n.d.) Manual del Programador NCP, disponible: <https://www.psr-inc.com> (octubre, 2018).
- Swarnkar, K. (2012). Economic Load Dispatch Problem with Reduce Power Losses using Firefly Algorithm, *Journal Advanced Computation Sci. Nad Technol.*, pp. 42–56.
- Waqar, A., Nawaf, M., Surafel, L., y Jean, M. (2016). *A Review and Comparative Study of Firefly Algorithm and its Modified Versions, Optimization Algorithms-Methods and Applications*, B. Ozgur, Ed. InTech, p. 35.
- Wood, A., y Wollenberg, B. (1996). *Power Generation, Operation and Control*, Second., vol. 37. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Yang, X. (2014). *Firefly Algorithms*, 1st Ed. London: Elsevier.
- Yang, X. (2009). *Firefly Algorithms for Multimodal Optimization, Stoch. Algorithms Found. Appl.*, vol. 5792, no. March 2010, pp. 169–178.
- Yang, X. (2010). *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms Second Edition*, 2nd Ed. United Kingdom: Luniver Press.

BIOGRAFÍAS



José Antonio Oscullo recibió el título de ingeniero eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional de Quito, Ecuador en 1996 y master en ingeniería eléctrica por la Universidad Estatal de Campinas, Sao Paulo, Brasil en 2002, es candidato a Doctor de Ingeniería eléctrica en la Escuela Politécnica Nacional en 2021. Su campo de investigación incluye el uso de minería de datos para la simulación y elementos de control en redes eléctricas inteligentes.



Santiago Pilaquina recibió el título de ingeniero eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional de Quito, Ecuador en 2018. Sus áreas de interés están relacionadas a la expansión del parque generador, técnicas de optimización de sistemas eléctricos y energías alternativas con fines de generación eléctrica.

