

# Algoritmo de búsqueda armónica modificado aplicado al cálculo del flujo óptimo de potencia

Alejandro Centeno, Demetrio Rey Lago\*, Gustavo Morales

*Instituto de Matemática y Cálculo Aplicado (IMYCA), Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo.*

---

## Resumen.-

En el presente artículo se expone la implementación del Algoritmo de Búsqueda Armónica Modificado (ABAM) para el cálculo del Flujo Óptimo de Potencia (FOP) en redes eléctricas con variables de control asociadas de tipo continuo. Las variables de control están conformadas por el nivel de tensión en las barras generadoras, la potencia activa suministrada por las unidades generadoras, la potencia reactiva suministrada por los compensadores en derivación y la posición de los cambiadores de toma bajo carga en los transformadores de potencia. La función a optimizar es el costo total de generación por unidad de tiempo. El algoritmo de Búsqueda Armónica original (ABA) y el ABAM son sometidos a prueba para el cálculo del FOP en la red IEEE – 30. Los resultados obtenidos demuestran que las modificaciones propuestas incrementan notablemente las capacidades del ABA para la resolución del problema de optimización aquí planteado. Finalmente, se comparan los resultados derivados a partir de la implementación del ABAM con los obtenidos mediante implementaciones previas, basadas en diversas técnicas metaheurísticas, evidenciándose que el algoritmo aquí propuesto computa soluciones similares a las mejores publicadas hasta el presente.

**Palabras clave:** Flujo de carga óptimo, Algoritmo de búsqueda armónica, Optimización.

## Modified harmony search algorithm applied to computing of optimal power flow

### Abstract.-

This article presents Modified Harmony Search Algorithm (MHSA) implementation for computing the optimal power flow (OPF) in electrical network with continuous control variables. The control variables set are given by level of voltage in the bars, active power generation supplied by generating units, compensating reactive power supplied by shunt reactor and position of load tap changers in power transformers. The function to optimize is the generation fuel cost. The original Harmonic Search Algorithm (HSA) and MHSA are tested for the computing OPF in IEEE – 30 network. The obtained results demonstrate here proposed modifications notably increase HSA capacities for the resolution of the optimization problem here enunciated. Finally, it compared the results derived from MHSA with obtained by previous diverse metaheuristics techniques implementations evidenced MHSA computes similar solutions to the best published until the present.

**Keywords:** Optimal power flow, Harmony search algorithm, Optimization.

Recibido: 15 febrero 2010

Aceptado: 10 octubre 2010

---

\*Autor para correspondencia

Correos-e: [adcenteno@uc.edu.ve](mailto:adcenteno@uc.edu.ve) (Alejandro Centeno), [drey@uc.edu.ve](mailto:drey@uc.edu.ve) (Demetrio Rey Lago), [gmorales@uc.edu.ve](mailto:gmorales@uc.edu.ve) (Gustavo Morales)

## 1. INTRODUCCIÓN

El cálculo del Flujo Óptimo de Potencia (FOP) constituye un problema de optimización no lineal

restringido con amplia aplicación en las áreas de operación y planificación de sistemas eléctricos de potencia [1] y cuya solución determina, para un conjunto de variables de control y estado, los valores óptimos de las mismas teniendo en cuenta las restricciones, en cuanto a niveles de operación y seguridad, propias de una red eléctrica de potencia. Desde su formulación inicial [2], el problema del cálculo del FOP ha sido objeto de una profusa labor de investigación tendiente a desarrollar e implementar métodos numéricos para su solución, tales como: Programación No Lineal [3], Programación Cuadrática Secuencial [4], Programación Lineal [5], Método de Newton [6], Minimización Secuencial No Restringida [7] y Método Paramétrico [8], entre otros.

Con el advenimiento de las técnicas de optimización metaheurísticas [9], se originó un nuevo campo de investigación en el área del tratamiento del cálculo del FOP. Las metaheurísticas constituyen estrategias inteligentes para diseñar o mejorar procedimientos heurísticos muy generales, con un alto rendimiento, y que comprenden un conjunto de técnicas iterativas, generalmente estocásticas, las cuales actúan sobre una población de individuos o agentes simples que son evolucionados o modificados mediante una serie de reglas previamente especificadas [10]. Técnicas de optimización metaheurísticas, tales como: Colonia de Hormigas [11], Evolución Diferencial [12], Algoritmo Genético [13], Búsqueda Tabu [14], Enjambre de Partículas [15] y Algoritmo de Búsqueda Armónica (ABA) [16], entre otros, han sido aplicadas exitosamente para la resolución del cálculo del FOP.

En particular, el ABA [17] es una técnica metaheurística, basada en población, e inspirada originalmente en el proceso de improvisación y afinación llevado a cabo por un conjunto o agrupación de músicos en la búsqueda de la armonía musical. Desde un punto de vista algorítmico, la Búsqueda Armónica es un proceso iterativo y estocástico que construye, en cada iteración, un vector solución siguiendo tres pautas básicas: búsqueda en la memoria armónica, ajuste por improvisación y, finalmente, búsqueda aleatoria.

En el presente artículo, se expone la imple-

mentación del Algoritmo de Búsqueda Armónica Modificado (ABAM) para el cálculo del FOP. Básicamente, en el ABAM se plantea la construcción del vector solución preservando intacta la pauta de la búsqueda en la memoria armónica pero modificando la estructura algorítmica del ajuste por improvisación y búsqueda aleatoria conjuntamente con la incorporación del concepto, formulado originalmente en el Algoritmo de Enjambre de Partículas [15], del vector solución con mejor desempeño. Adicionalmente, el ABAM incluye en su estructura algorítmica la implementación del concepto de pared reflectante [18], y el criterio desarrollado por Deb. K. [19], para la supervisión y control del cumplimiento de las restricciones que como problema de optimización plantea el cálculo del FOP.

En cuanto a la formulación del FOP como problema de optimización, en el presente artículo sus variables de control asociadas son consideradas de tipo continuo y están conformadas por el nivel de tensión en las barras generadoras, la potencia activa suministrada por las unidades generadoras, la potencia reactiva suministrada por los compensadores en derivación y la posición de los cambiadores de toma bajo carga en los transformadores de potencia. La función a optimizar es el costo total de generación por unidad de tiempo.

Por último, y con la finalidad de establecer las comparaciones respectivas, en el presente estudio se implementa el ABA y el ABAM para el cálculo del FOP en la red de prueba IEEE – 30. Los resultados obtenidos demuestran que las modificaciones propuestas incrementan notablemente las capacidades del ABA para la resolución del problema de optimización aquí planteado. Finalmente, se comparan los resultados derivados a partir de la implementación del ABAM con los obtenidos mediante implementaciones previas, basadas en diversas técnicas metaheurísticas, evidenciándose que el algoritmo propuesto computa soluciones similares a las mejores publicadas hasta el presente.

## 2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE FLUJO DE CARGA ÓPTIMO DE POTENCIA

En esencia, el cálculo del FOP constituye un problema de optimización no lineal restringido consistente en minimizar una función objetivo sujeta a restricciones de tipo operacionales y de seguridad propias de una red eléctrica de potencia. El problema del cálculo del FOP, tal y como se le conoce en la actualidad, fue originalmente formulado en los trabajos realizados por Dommel y Tinney [2] como una extensión del problema del cálculo de Despacho Económico. Partiendo de un flujo de potencia factible, estos investigadores propusieron minimizar el costo total de generación por unidad de tiempo incluyendo las ecuaciones de flujo de potencia, como restricciones de igualdad, y los límites máximos y mínimos de las variables de estado y control, conjuntamente con los límites de generación de potencia reactiva, como restricciones de desigualdad.

Matemáticamente, el FOP se formula de la siguiente manera

$$\min f = \sum_{i=1}^{ng} a_i + b_i \cdot P_{Gi} + c_i \cdot P_{Gi}^2, \quad (1)$$

sujeto a:

$$h = \begin{cases} P_{gi} - P_{di} - \sum_{j=1}^n |V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) = 0 & i = 1, \dots, n-1 \\ Q_{gi} - Q_{di} - \sum_{j=1}^n |V_i||V_j||Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) = 0 & i = 1, \dots, npq \end{cases} \quad (2)$$

$$g = \begin{cases} P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} & i = 1, 2, \dots, ng \\ Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} & i = 1, 2, \dots, ng \\ |V_{Gi}|^{\min} \leq |V_{Gi}| \leq |V_{Gi}|^{\max} & i = 1, 2, \dots, ng \\ t_i^{\min} \leq t_i \leq t_i^{\max} & i = 1, 2, \dots, nt \\ Q_{Ci}^{\min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci}^{\max} & i = 1, 2, \dots, nC \\ |V_i|^{\min} \leq |V_i| \leq |V_i|^{\max} & i = 1, 2, \dots, n-1 \\ \delta_i^{\min} \leq \delta_i \leq \delta_i^{\max} & i = 1, 2, \dots, n-1 \\ |S_{ri}| \leq |S_{ri}|^{\max} & i = 1, 2, \dots, nr \end{cases} \quad (3)$$

donde

$n$ : número de nodos o barras.

$npq$ : número de nodos o barras tipo PQ.

$nr$ : número de ramas.

$ng$ : número de unidades generadoras.

$nt$ : número de transformadores de potencia.

$nc$ : número de unidades compensadoras en derivación.

$P_{Gi}$ : potencia activa suministrada por la  $i$ -ésima unidad generadora.

$Q_{Gi}$ : potencia reactiva suministrada por la  $i$ -ésima unidad generadora.

$|V_{Gi}|$ : magnitud del voltaje en la  $i$ -ésima unidad generadora.

$Q_{Ci}$ : potencia reactiva suministrada por el  $i$ -ésimo compensador en derivación.

$|V_i|$ : magnitud del voltaje en la  $i$ -ésima barra.

$\delta_i$ : fase del voltaje en la  $i$ -ésima barra.

$P_{gi}$ : potencia activa total generada en la  $i$ -ésima barra.

$Q_{gi}$ : potencia reactiva total generada en la  $i$ -ésima barra.

$P_{di}$ : potencia activa total demandada en la  $i$ -ésima barra.

$Q_{di}$ : potencia reactiva total demandada en la  $i$ -ésima barra.

$|Y_{ij}|$ : magnitud de la admitancia entre las barras  $i$ -ésima y  $j$ -ésima.

$\alpha_{ij}$ : fase de la admitancia entre las barras  $i$ -ésima y  $j$ -ésima.

$t_i$ : valor del cambiador de toma bajo carga del  $i$ -ésimo transformador de potencia.

$|S_{ri}|$ : magnitud de la potencia total transmitida a través de la  $i$ -ésima rama.

$a_i, b_i, c_i$ : coeficientes de costos de generación para la  $i$ -ésima unidad.

$P_{Gi}^{min}, P_{Gi}^{max}$ : límites de suministro de potencia activa para la  $i$ -ésima unidad generadora.

$Q_{Gi}^{min}, Q_{Gi}^{max}$ : límites de suministro de potencia reactiva para la  $i$ -ésima unidad generadora.

$|V_{Gi}|^{min}, |V_{Gi}|^{max}$ : límites para la magnitud del voltaje en la  $i$ -ésima unidad generadora.

$t_i^{min}, t_i^{max}$ : límites para el valor del cambiador de toma bajo carga del  $i$ -ésimo transformador.

$Q_{Ci}^{min}, Q_{Ci}^{max}$ : límites de suministro de potencia reactiva en la  $i$ -ésima unidad compensadora.

$|V_i|^{min}, |V_i|^{max}$ : límites para la magnitud del voltaje en la  $i$ -ésima barra.

$\delta_i^{min}, \delta_i^{max}$ : límites para la fase del voltaje en la  $i$ -ésima barra.

$|S_{ri}|^{max}$ : magnitud de la potencia total máxima transmitida a través de la  $i$ -ésima rama.

Por definición las variables de control ( $\vec{x}_{cont}$ ) y estado ( $\vec{x}_{est}$ ) están constituidas por los siguientes conjuntos

$$\vec{x}_{cont}^T = [|V_{G1}| |V_{G2}| \dots |V_{Gng}| P_{G1} P_{G2} \dots P_{G(ng-1)} t_1 t_2 \dots t_{nt} Q_{c1} Q_{c2} \dots Q_{cnc}] \quad (4)$$

$$\vec{x}_{est}^T = [P_{ref} |V_1| \dots |V_{npq}| \delta_1 \dots \delta_{n-1} Q_{G1} Q_{G2} \dots Q_{Gng} |S_{r1}| |S_{r2}| \dots |S_{rmr}|], \quad (5)$$

donde

$P_{ref}$ : potencia activa suministrada por la barra de referencia.

$(\cdot)^T$ : denota la operación transposición.

### 3. ALGORITMO DE BÚSQUEDA ARMÓNICA

El ABA [17] es una técnica metaheurística, basada en población, e inspirada originalmente en el proceso de improvisación y afinación llevado a cabo por un conjunto o agrupación de músicos

en la búsqueda de la armonía musical. Desde un punto de vista algorítmico, la Búsqueda Armónica es un proceso iterativo y estocástico que construye, en cada iteración, un vector solución ( $\vec{x}s$ ) con fundamento en tres pautas básicas, a saber:

- Búsqueda en la matriz de memoria armónica.
- Ajuste por improvisación
- Búsqueda aleatoria.

Tras construir el nuevo vector solución, se evalúa el desempeño de esta propuesta y se compara con aquella solución, almacenada en la matriz de memoria armónica, que presente el peor desempeño ( $\vec{x}w$ ). Si la nueva propuesta supera a la peor almacenada entonces la sustituye, actualizando de esta forma la memoria armónica. Lo anterior se condensa en el siguiente pseudocódigo:

```
{PHMCR, PPAR, BW, HMS, H(0)} ←
InicializadorParámetros()
k ← 0
```

**Mientras** no se alcance condición de parada

**Para**  $i=1$  hasta  $n$  ←

Construir Nuevo Vector Solución()

**Si**  $U(0, 1) \leq P_{HMCR}$

$xs_i^{(k+1)} = x_{(j)}^{(k)}$ , donde  $j \in 1, 2, \dots, HMS$  ←

Búsqueda en Memoria Armónica()

**Si**  $U(0, 1) \leq P_{PAR}$

$xs_i^{(k+1)} = xs_i^{(k+1)} + r^{(k+1)} \cdot BW$  ←

Ajuste por Improvisación()

**Fin Si**

**Si no**

$xs_i^{(k+1)} = x_i^{min} + r^{(k+1)} \cdot (x_i^{max} - x_i^{min})$

← Búsqueda Aleatoria()

**Fin Si**

**Fin Para**

$\vec{x}s^{(k+1)} = [xs_1^{(k+1)}, xs_2^{(k+1)}, \dots, xs_n^{(k+1)}]$  ←

Nuevo Vector Solución()

$\{f(\vec{x}s^{(k+1)})\}$  ← Evaluar Desempeño()

$\{H^{(k+1)}\}$  ← Actualizar Memoria Armónica()

$k \leftarrow k + 1$

**Fin Mientras**

Salida → mejor solución encontrada

Donde:

$0 \leq P_{HMCR} \leq 1$  : Probabilidad asociada a la selección aleatoria de un valor almacenado en la

memoria armónica.

$0 \leq P_{PAR} \leq 1$  : Probabilidad asociada al ajuste por “improvisación” de un valor seleccionado aleatoriamente en la memoria armónica.

$BW > 0$  : Ancho de banda de la distancia entre rango de valores permitidos.

$r^{(k)} \in U(0,1)$  : Valor aleatorio asignado en cada iteración efectuada.

$U(0,1)$  : Función de distribución de probabilidades uniforme entre 0 y 1.

$x_i^{\min}, x_i^{\max}$  : Representan los límites de valores permitidos para la  $i$ -ésima dimensión.

$f(\cdot)$  : Función objetivo.

$HMS$  : Número de filas de la matriz de memoria armónica.

$H$ : Matriz de memoria armónica, la cual presenta la siguiente estructura

$$H^{(k)} =$$

$$\left[ \begin{array}{cccc|c} x_{(1)1}^{(k)} & x_{(1)2}^{(k)} & \dots & x_{(1)n}^{(k)} & f(\vec{x}_{(1)}^{(k)}) \\ x_{(2)1}^{(k)} & x_{(2)2}^{(k)} & \dots & x_{(2)n}^{(k)} & f(\vec{x}_{(2)}^{(k)}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ x_{(HMS)1}^{(k)} & x_{(HMS)2}^{(k)} & \dots & x_{(HMS)n}^{(k)} & f(\vec{x}_{(HMS)}^{(k)}) \end{array} \right]$$

#### 4. ALGORITMO DE BÚSQUEDA ARMÓNICA MODIFICADO

En el presente trabajo, cada vector almacenado en la memoria armónica estará constituido por los valores asociados a las variables de control especificadas por la ecuación (4). El proceso de construcción del vector solución ( $\vec{x}s$ ), se ha implementado de acuerdo al siguiente pseudocódigo:

**Para**  $i = 1$  hasta  $nvarcont$  ←  
*ConstruirNuevoVectorSolución()*

**Si**  $U(0,1) \leq P_{HMCR}$

$$x_{s_i}^{(k+1)} = x_{(j)i}^k \text{ donde } j \in \{1, 2, \dots, HMS\} \leftarrow$$

*Búsqueda en Memoria Armónica()*

**Si**  $U(0,1) \leq P_{PAR}$  ←

*Ajuste por Improvisación()*

**Si**  $x_{s_i}^{(k+1)} \neq x_{m_i}^{(k)}$

$$x_{s_i}^{(k+1)} = x_{s_i}^{(k+1)} + r^{(k+1)} \cdot BW \cdot (x_{cont(i)}^{\max} -$$

$$x_{cont(i)}^{\min}) \cdot \text{sign}(x_{m_i}^{(k)} - x_{s_i}^{(k+1)})$$

**Sino**

$$x_{s_i}^{(k+1)} = x_{s_i}^{(k+1)} + \varphi \cdot (x_{cont(i)}^{\max} - x_{cont(i)}^{\min}) \cdot \text{sign}(r^{(k+1)} - 0,5)$$

**Fin Si**

**Fin Si**

**Sino**

$$x_{s_i}^{(k+1)} = x_{m_i}^{(k)} + \varphi \cdot (x_{cont(i)}^{\max} - x_{cont(i)}^{\min}) \cdot \text{sign}(r^{(k+1)} - 0,5) \leftarrow \text{BúsquedaAleatoria()}$$

**Fin Si**

**Fin Para**

Donde:

$nvarcont$  : Número de variables de control.

$x_{cont(i)}^{\min}, x_{cont(i)}^{\max}$  : Representan los límites de valores permitidos para la  $i$ -ésima variable de control.

$\vec{x}m^{(k)} = [xm_1^{(k)}, xm_2^{(k)}, \dots, xm_{nvarcont}^{(k)}]$  : Vector solución con mejor desempeño global para la  $k$ -ésima iteración. Este vector estará almacenado en la memoria armónica.

$\varphi > 0$  : Parámetro para el ajuste por improvisación ó selección aleatoria.

$\text{sign}(\cdot)$  : Función signo, la cual viene dada por;

$$\text{sign}(\xi) = \begin{cases} -1 & \text{si } \xi < 0 \\ 0 & \text{si } \xi = 0 \\ +1 & \text{si } \xi > 0 \end{cases}$$

A fin de satisfacer las restricciones dadas por la ecuación (3), para las variables de control, se ha implementado el concepto de pared reflectante [18] sobre cada una de las componentes del vector solución ( $\vec{x}s^{(k+1)}$ ), de acuerdo al siguiente pseudocódigo:

**Para**  $i = 1$  hasta  $nvarcont$

**Si**  $x_{s_i}^{(k+1)} < x_{cont(i)}^{\min}$

$$x_{s_i}^{(k+1)} = 2 \cdot x_{cont(i)}^{\min} - x_{s_i}^{(k+1)}$$

**Sino Si**  $x_{s_i}^{(k+1)} > x_{cont(i)}^{\max}$

$$x_{s_i}^{(k+1)} = 2 \cdot x_{cont(i)}^{\max} - x_{s_i}^{(k+1)}$$

**Fin si**

**Fin Para**

Tras la generación del vector solución ( $\vec{x}s^{(k+1)}$ ), y la correspondiente verificación del cumplimiento de las restricciones dadas por la ecuación (3) para las variables de control, en el presente artículo se ha implementado el algoritmo de Newton – Raphson [20] para el cálculo de los valores asociados a las variables contenidas en el vector de estado de la red ( $\vec{x}_{est}^{(k+1)}$ ). Una vez construido el vector  $\vec{x}_{est}^{(k+1)}$  se procede a la contabilización del

número de restricciones, impuestas por la ecuación (3), satisfechas por las variables de estado.

Finalmente, se ejecuta la actualización de la matriz de memoria armónica ( $H^{(k+1)}$ ), y el vector con mejor desempeño ( $\vec{x}m^{(k+1)}$ ), siguiendo el criterio desarrollado por Deb K. [19] para el manejo de restricciones, el cual establece:

- Entre una solución factible y una no factible se seleccionará la factible.
- Entre dos soluciones factibles se seleccionará la de mayor optimalidad.
- Entre dos soluciones no factibles se seleccionará la de menor no factibilidad.

En el presente artículo, el criterio de Deb K. [19] se ha implementado de acuerdo al siguiente pseudocódigo:

Actualización de  $H$

**Si**  $nrxs^{(k+1)} > nrxw^{(k)}$

$$\vec{x}w^{(k+1)} \leftarrow \vec{x}s^{(k+1)}$$

$$nrxw^{(k+1)} \leftarrow nrxs^{(k+1)}$$

$$f_w^{(k+1)} \leftarrow f_s^{(k+1)}$$

**Sino Si**  $nrxs^{(k+1)} = nrxw^{(k)}$

$$\text{Si } f_s^{(k+1)} < f_w^{(k+1)}$$

$$\vec{x}w^{(k+1)} \leftarrow \vec{x}s^{(k+1)}$$

$$f_w^{(k+1)} \leftarrow f_s^{(k+1)}$$

**Fin si**

**Fin si**

Actualización de  $\vec{x}m$

**Si**  $nrxs^{(k+1)} > nrsmg^{(k)}$

$$\vec{x}mg^{(k+1)} \leftarrow \vec{x}_i^{(k+1)}$$

$$nrsmg^{(k+1)} \leftarrow nrxs^{(k+1)}$$

$$f_m^{(k+1)} \leftarrow f_s^{(k+1)}$$

**Sino Si**  $nrxs^{(k+1)} = nrsmg^{(k)}$

$$\text{Si } f_s^{(k+1)} < f_m^{(k+1)}$$

$$\vec{x}m^{(k+1)} \leftarrow \vec{x}s^{(k+1)}$$

$$f_m^{(k+1)} \leftarrow f_s^{(k+1)}$$

**Fin si**

**Fin si**

Donde:

$nrxw^{(k)}$  y  $nrxm^{(k)}$ : Denotan el número de restricciones satisfechas por los vectores de estados generados a partir de  $\vec{x}s^{(k+1)}$ ,  $\vec{x}w^{(k+1)}$  y  $\vec{x}m^{(k+1)}$ , respectivamente.

$f_s^{(k+1)}$ ,  $f_w^{(k)}$ ,  $f_m^{(k)}$ : Denotan el valor de la función objetivo, dada por la ecuación (1), evaluada en  $\vec{x}s^{(k+1)}$ ,  $\vec{x}w^{(k)}$ ,  $\vec{x}m^{(k)}$ , respectivamente.

## 5. DESEMPEÑO DEL ALGORITMO PROPUESTO

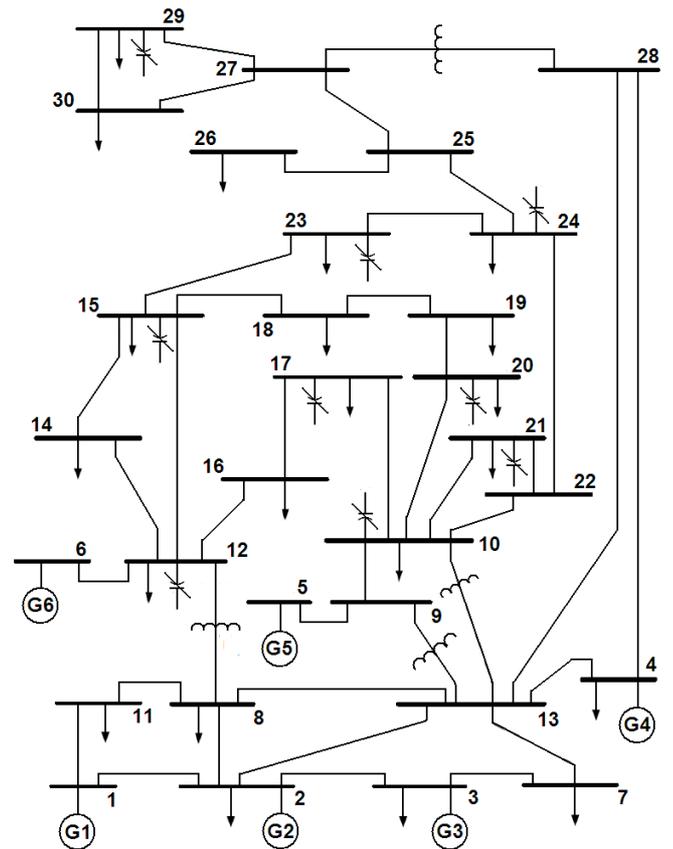


Figura 1: Diagrama unifilar de la red de prueba IEEE – 30 [21].

Se ha implementado el ABA y ABAM para el cálculo del FOP en la red de prueba IEEE – 30, la cual se muestra en la Figura 1. Los datos asociados a la red fueron obtenidos en [21].

Para los parámetros del ABA y ABAM, se asignaron los valores mostrados en la Tabla 1.

Se efectuaron sesenta (60) ejecuciones independientes del ABA y ABAM para el cálculo del FOP en la red IEEE – 30. Para la implementación de los códigos se utilizó Scilab v-5.3.0. Las ejecuciones se efectuaron en una computadora personal dotada de un procesador Intel® doble núcleo de 1,60 GHz con 500 MB de memoria RAM.

Tabla 1: Valores asignados para los parámetros del ABA y ABAM.

Parámetro	Valor asignado
Probabilidad selección aleatoria ( $P_{HMCR}$ )	0,65
Probabilidad ajuste por improvisación ( $P_{PAR}$ )	0,35
Ancho de banda ( $BW$ )	0,05
Parámetro de ajuste por improvisación ( $\varphi$ )	0,0025
Número de filas matriz armónica ( $HMS$ )	20
Número de iteraciones máximas ( $k_{m\acute{a}x}$ )	3000
Tolerancia para desajuste de potencia en Newton – Raphson ( $Tol$ )	0,0001

Tabla 2: Resultados computados para la función costos de generación.

	Mejor valor (\$/hr)	Valor medio (\$/hr)	Peor valor (\$/hr)	Desviación típica (\$/hr)	Índice de dispersión
ABAM	800,58	800,76	801,05	0,12	0,47
ABA	803,04	805,18	810,92	1,74	7,88

En la Tabla 2, se muestra los resultados obtenidos para la función costos de generación por unidad de tiempo computados por el ABA y ABAM:

En la Tabla 3, se muestran los valores (en p.u.) computados por el ABAM, asociados al mejor valor obtenido para la función costos de generación, para la magnitud del voltaje, la potencia activa y reactiva suministrada por las unidades generadoras, conjuntamente con sus valores límites permitidos.

En la Tabla 4, se muestran los valores (en p.u.) computados por el ABAM, asociados al mejor valor obtenido para la función costos de generación, para los cambiadores de toma bajo carga en los transformadores de potencia conjuntamente con sus valores límites permitidos.

En la Tabla 5, se muestra los valores (en p.u.) computados por el ABAM, asociados al mejor valor obtenido para la función costos de generación, para la potencia reactiva suministrada por las unidades compensadoras en derivación ( $Q_{Ci}$ ) conjuntamente con sus valores límites permitidos.

En la Tabla 6, se muestra los valores (en p.u.) computados por el ABAM, asociados al mejor valor obtenido para la función costos de generación, para la potencia total transmitida en cada rama conjuntamente con sus valores límites

permitidos.

En la Tabla 7, se muestran los valores computados por el ABAM, asociados al mejor valor obtenido para la función costos de generación, para la magnitud y ángulo de fase del voltaje en barra, en p.u. y radianes respectivamente, conjuntamente con sus valores límites permitidos.

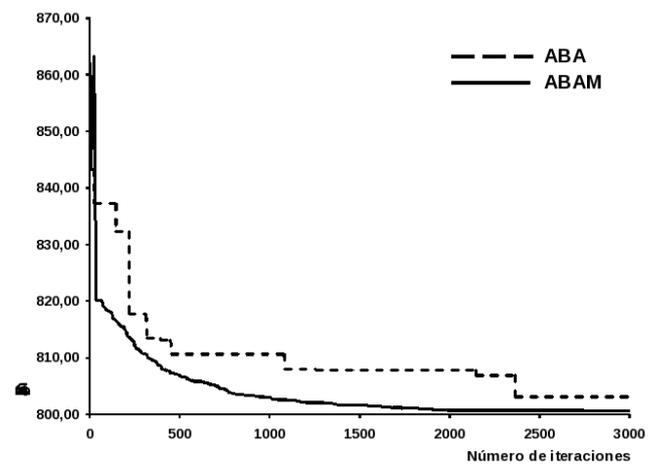


Figura 2: Evolución de los costos de generación versus el número de iteraciones.

En la Figura 2, se muestra la evolución de los costos de generación por unidad de tiempo en función del número de iteraciones para el mejor valor computado por ABA y ABAM.

Tabla 3: Valores óptimos computados para las unidades generadoras ( $S_{BASE} = 100MVA$ ).

Barra N°	$ V_{Gi} $	$ V_{Gi} ^{min}$	$ V_{Gi} ^{max}$	$P_{Gi}$	$P_{Gi}^{min}$	$P_{Gi}^{max}$	$Q_{Gi}$	$Q_{Gi}^{min}$	$Q_{Gi}^{max}$
1	1,0838			1,7696	0,50	2,00	0,9970	-0,20	2,00
2	1,0647			0,4885	0,20	0,80	0,2088	-0,20	1,00
3	1,0342	0,90	1,10	0,2140	0,15	0,50	0,2678	-0,15	0,80
4	1,0375			0,2110	0,10	0,35	0,2620	-0,15	0,60
5	1,0619			0,1207	0,10	0,30	0,0680	-0,10	0,50
6	1,0415			0,1205	0,12	0,40	-0,0596	-0,15	0,60

Tabla 4: Valores óptimos computados para los cambiadores de toma bajo carga

Transformador N°	Barra inicial	Barra final	$t_i$	$t_i^{min}$	$t_i^{max}$
1	13	9	0,9958		
2	13	10	0,9595	0,90	1,10
3	8	12	0,9670		
4	28	27	0,9767		

Finalmente, en la Tabla 8 se muestra los resultados comparativos entre el mejor valor computado por el ABAM para la función costos de por unidad de tiempo y pérdidas de potencia activa totales, asociada a la red IEEE – 30, con los obtenidos mediante la implementación de las técnicas meta-heurísticas: Algoritmo Genético (AG), Algoritmo de Enjambre de Partículas (AEP), Algoritmo Genético Difuso (AGD), Algoritmo de Programación Evolutiva (APE), Algoritmo de Evolución Diferencial (AED) y Algoritmo de Búsqueda Armónica (ABA).

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de los resultados obtenidos y expuestos en la sección anterior, se evidencia que las modificaciones propuestas en el presente estudio mejoran sustancialmente las capacidades del ABA para el cálculo del FOP en la red IEEE – 30. En promedio, tras sesenta (60) ejecuciones independientes, el ABAM computó una solución de mayor optimalidad que el ABA, para la función costos de generación por unidad de tiempo, según se desprende de la comparación entre los 800,76

\$/hr promedio, obtenidos por ABAM, frente a los 805,18 \$/hr promedio obtenidos por ABA.

En cuanto a la estabilidad como algoritmo de cálculo numérico, las modificaciones planteadas se han traducido en una notable mejora de este aspecto comparado con el ABA original. Tras sesenta (60) ejecuciones independientes, el índice de dispersión máximo y la desviación típica asociadas a los sesenta (60) valores computados para la función costos de generación por unidad de tiempo resultaron en 0,47 \$/hr y 0,12 \$/hr, respectivamente, obtenidos por ABAM frente a los 7,88 \$/hr y 1,74\$/hr, respectivamente, obtenidos por ABA.

Por otra parte, la implementación conjunta del concepto de pared reflectante [18] y el criterio propuesto por Deb K. [19] ha evidenciado su eficacia para el manejo de las restricciones, que como problema de optimización, ha planteado el cálculo del FOP en la red IEEE – 30. Del conjunto de sesenta (60) ejecuciones efectuadas por el ABAM resultaron factibles cincuenta y nueve (59), es decir, se registró una efectividad superior al 98 % para la consecución del espacio de soluciones factibles. Cabe señalar que el valor obtenido para la función costos de generación por unidad de tiempo, en la única solución no

Tabla 5: Valores óptimos computados para las unidades compensadoras ( $S_{BASE} = 100MVA$ ).

Unidad N°	Barra N°	$Q_{Ci}$	$Q_{Ci}^{min}$	$Q_{Ci}^{max}$
1	10	0,0478		
2	12	0,0414		
3	15	0,0394		
4	17	0,0429		
5	20	0,0369	0,00	0,05
6	21	0,0381		
7	23	0,0452		
8	24	0,0434		
9	29	0,0323		

factible computada, fue de 800,28 \$/hr con el no cumplimiento de una (01) de las ciento veinticinco (125) restricciones de desigualdad asociadas al cálculo del FOP en la red IEEE – 30.

Específicamente, el valor computado para el ángulo de fase del voltaje en la barra número treinta (30) fue de -0,2517 rad quedando por debajo del límite permitido de -0,2443 rad. Finalmente, y al comparar los resultados derivados a partir de la implementación del ABAM con los obtenidos mediante implementaciones previas basadas en diversas técnicas metaheurísticas, se evidencia que el algoritmo propuesto computa soluciones similares a las mejores publicadas hasta el presente para el cálculo del FOP en la red IEEE – 30.

En particular, el mejor valor obtenido por ABAM para la función costos de generación por unidad de tiempo resultó de mayor optimalidad a los publicados en [13], [22–23] y [25–26], siendo superado por los publicados en [15] y [24]. Resulta oportuno indicar que la solución reportada en [24] incumple cuatro (04) restricciones de desigualdad asociadas a los niveles de voltaje permitidos en las barras tipo PQ.

## 7. CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha expuesto la aplicación del Algoritmo de Búsqueda Armónica Modificado (ABAM) para el cálculo del FOP

en redes eléctricas con variables de control asociadas de tipo continuo. En el ABAM se ha planteado, y hasta donde el conocimiento de los autores así lo permite aseverar, por primera vez la modificación de la estructura algorítmica del ajuste por improvisación y búsqueda aleatoria con la incorporación del vector solución con mejor desempeño. Adicionalmente, en la estructura algorítmica del ABAM se ha incluido el concepto de pared reflectante, y el criterio desarrollado por Deb. K., para la supervisión y control del cumplimiento de las restricciones que como problema de optimización plantea el cálculo del FOP.

Los resultados obtenidos demuestran que el ABAM representa una mejora sustancial del ABA en cuanto a capacidad de optimización, estabilidad numérica y manejo de las restricciones asociadas al cálculo del FOP en la red de prueba IEEE – 30. Finalmente, la comparación con los resultados derivados a partir de implementaciones previas, basadas en diversas técnicas metaheurísticas, han evidenciado que el ABAM computa soluciones similares a las mejores publicadas hasta el presente.

## Referencias

- [1] Momoh, J., Koessler, R., Bond, M., Stott, B., Sun, D., Papalexopoulos, A., and Ristanovic, P., (1997): “Challenges to optimal power flow”, IEEE Trans. Power Systems, Vol. 12, pp. 444–455.

Tabla 6: Valores computados para la potencia total transmitida por rama ( $S_{BASE} = 100MVA$ ).

Rama $N^\circ$	Barra inicial	Barra final	$ S_{ri} $	$ S_{ri} ^{max}$	Rama $N^\circ$	Barra inicial	Barra final	$ S_{ri} $	$ S_{ri} ^{max}$
1	1	2	1,1843	1,30	22	15	18	0,0574	0,16
2	1	11	0,5886	1,30	23	18	19	0,0249	0,16
3	2	8	0,3426	0,65	24	19	20	0,0796	0,32
4	11	8	0,5495	1,30	25	10	20	0,0938	0,32
5	2	3	0,6364	1,30	26	10	17	0,0635	0,32
6	2	13	0,4543	0,65	27	10	21	0,1667	0,32
7	8	13	0,4981	0,90	28	10	22	0,0789	0,32
8	3	7	0,1332	0,70	29	21	22	0,0280	0,32
9	13	7	0,3406	1,30	30	15	23	0,0494	0,16
10	13	4	0,1129	0,32	31	22	24	0,0568	0,16
11	13	9	0,1878	0,65	32	23	24	0,0222	0,16
12	13	10	0,1545	0,32	33	24	25	0,0171	0,16
13	9	5	0,1369	0,65	34	25	26	0,0426	0,16
14	9	10	0,3085	0,65	35	25	27	0,0597	0,16
15	8	12	0,3364	0,65	36	28	27	0,1891	0,65
16	12	6	0,1355	0,65	37	27	29	0,0623	0,16
17	12	14	0,0748	0,32	38	27	30	0,0710	0,16
18	12	15	0,1768	0,32	39	29	30	0,0401	0,16
19	12	16	0,0689	0,32	40	4	28	0,0416	0,32
20	14	15	0,0167	0,16	41	13	28	0,1917	0,32
21	16	17	0,0355	0,16					

- [2] Dommel, H., and Tinney, W., (1968): "Optimal power flow solutions", IEEE Trans. Power Appar. Syst., Vol. 87, pp. 1866 – 1876.
- [3] Alsac, O., Stott, B., (1974): "Optimal Load Flow with Steady State Security", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 93, pp.745 – 751.
- [4] Grudin, N., (1997): "Combined Quadratic–Separable Programming OPF Algorithm for Economic Dispatch and Security Control", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, N° 4, pp. 1682 – 1688.
- [5] Almeida, K., Salgado, R., (2000): "Optimal Power Flow Solutions Under Variable Load Conditions", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 15, No. 4, pp. 1204 – 1211.
- [6] Aoki, K., Kanezashi, M., (1985): "A Modified Newton Method for Optimal Power Flow Using Quadratic Approximation Power Flow", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 104, N° 8, pp. 2119 – 2124.
- [7] Rahli, M., (1999): "Optimal Power Flow Using Sequential Unconstrained Minimization Technique (SUMT) Method Under Power Transmission Losses Minimization", Electric Power System Research, Vol. 52, pp. 61 – 64.
- [8] Almeida, K., Galiana, F., Soares, S., (1994): "A General Parametric Optimal Power Flow", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, N° 1, pp. 540 – 547.
- [9] Glover, F., (1986): "Future paths for integer programming and links to artificial intelligence", Computers and Operations Research, N° 13, pp. 533 – 549.
- [10] Melián, B., Moreno, J.A., & Moreno, J.M., (2003): "Metaheuristics: A global view", Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial, N° 19, pp. 7 – 28.
- [11] Allaoua, B., Laoufi, A., (2009): "Optimal Power Flow Solution Using Ant Manners for Electrical Network", Advances in Electrical and Computer Engineering, Vol. 9, N° 1, pp. 34 – 40.
- [12] Vaisakh, K., and Srinivas, L., (2008): "Differential Evolution Approach for Optimal Power Flow Solution", Journal of Theoretical and Applied Information Technology, Vol. 2, pp. 261 – 268.
- [13] Bouktir, T., Slimani, L., Belkacemi, M., (2004): "A Genetic Algorithm for Solving the Optimal Power Flow Problem", Leonardo Journal of Sciences, Issue 4, pp. 44 – 58.
- [14] Abido, M., (2002): "Optimal Power Flow Using Tabu Search Algorithm", Electric Power Components and Systems, Vol. 30, pp. 469 – 483.
- [15] Abido, M., (2002): "Optimal power flow using particle

Tabla 7: Valores óptimos computados para la magnitud y ángulo de fase del voltaje en barra.

Barra N°	$V_i$	$ V_i ^{mín}$	$ V_i ^{máx}$	$\delta_i$	$\delta_i^{mín}$	$\delta_i^{máx}$
1	1,0838			0,0000		
2	1,0647			-0,0590		
3	1,0342	0,90	1,10	-0,1718		
4	1,0375			-0,1347		
5	1,0619			-0,1431		
6	1,0415			-0,1658		
7	1,0294			-0,1561		
8	1,0417			-0,1107	-0.2443	0,0000
9	1,0489			-0,1657		
10	1,0460			-0,1964		
11	1,0499			-0,0922		
12	1,0496			-0,1813		
13	1,0388			-0,1303		
14	1,0397			-0,1981		
15	1,0394			-0,2027		
16	1,0423			-0,1932		
17	1,0420			-0,2000		
18	1,0322	0,95	1,05	-0,2137		
19	1,0311			-0,2169		
20	1,0358			-0,2136		
21	1,0369			-0,2055		
22	1,0376			-0,2054		
23	1,0373			-0,2129		
24	1,0312			-0,2148		
25	1,0365			-0,2116		
27	1,0192			-0,2186		
28	1,0483			-0,2050		
29	1,0382			-0,1397		
30	1,0383			-0,2300		

swarm optimization”, *Electrical Power and Energy Systems*, N° 24, pp. 563 – 571.

- [16] Panigrahi, B., Ravikumar, V., Das, S., Abraham, A., (2010): “Population Variance Harmony Search Algorithm to Solve Optimal Power Flow with Non-Smooth Cost Function”, *Recent Advances in Harmony Search Algorithm*, Studies in Computational Intelligence, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Vol. 270, pp. 65 – 75, 2010.
- [17] Geem, Z.W., Kim, J.H., Loganathan, G.V., (2001): “A new heuristic optimization algorithm: harmony search”, *Simulation*, Vol. 76, N° 2, pp. 60 – 68.
- [18] Robinson, J., and Rahmat – Samii, Y., (2004): “Particle swarm optimization in electromagnetic”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 52, N° 2, pp. 397 – 407.
- [19] Deb, K., (2000): “An efficient constraint handling method for genetic algorithms”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 186, N° 2-4, pp. 311 – 338.
- [20] Arrillaga, J., Arnold, C., and Harker, B., (1983): “Computer Modelling of Electrical Power Systems”, Jhon Wiley & Sons, Chichester.
- [21] Dutta, A., (2009): “Single Objective Optimal Power Flow Using Particle Swarm Optimization”, Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the award of degree of Master of Engineering in Power Systems & Electrical Drives, Electrical and Instrumentation Engineering Department, Thapar University, Patiala.
- [22] Labdani, R., Slimani, L., Bouktir, T., (2006): “Particle Swarm Optimization Applied to the Economic Dispatch Problem”, *J. Electrical Systems*, Vol. 2, N° 2, pp. 95 – 102.

Tabla 8: Resultados comparativos, obtenidos mediante la implementación de diversas técnicas metaheurísticas, para la minimización de la función costos de generación por unidad de tiempo en la red de prueba IEEE – 30

Técnica implementada	Costos de generación [\$/hr]	Pérdidas de potencia activa [MW]
AG [13]	803,70	9,52
AEP [15]	800,41	9,00
AEP [22]	801,99	9,38
AEP [23]	800,74	8,96
AGD [24]	800,44	8,85
APE [25]	802,56	9,37
AED [26]	802,40	9,48
ABA [este reporte]	803,04	8,71
ABAM [este reporte]	800,58	9,04

- [23] Swarup, K., (2006): “Swarm intelligence approach to the solution of optimal power flow”, *J. Indian Inst. Sci.*, Vol. 86, pp. 439 – 455.
- [24] Saini, A., and Saxena, A., (2008): “Enhanced GA-Fuzzy OPF under both Normal and Contingent Operation States”, *International Journal of Electrical, Computer, and Systems Engineering*, Vol. 2, N° 3, pp. 208 – 216.
- [25] Yuryevich, J., Wong, K., (1999): “Evolutionary Programming Based Optimal Power Flow Algorithm”, *IEEE Transaction on power Systems*, Vol. 14, N° 4, pp. 1245 – 1250.
- [26] Thitithamrongchai, C., and Eua-arporn, B., (2007): “Self-adaptive Differential Evolution Based Optimal Power Flow for Units with Non-smooth Fuel Cost Functions”, *J. Electrical Systems*, Vol. 3, N° 2, pp. 88 – 99.