

Minimización de pérdidas eléctricas en sistemas industriales utilizando algoritmo genético

Minimization of electrical losses in industrial systems using genetic algorithm

Zocimo Ñaupari^{*}, Alex Coronel¹, Yuri Molina², Luiz Pontes²

¹ Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.

² Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. Paraíba, Brasil.

Recibido (Received): 14/10/2018

Aceptado (Accepted): 17/12/2018

RESUMEN

En este artículo se propone un procedimiento para minimizar las pérdidas eléctricas en sistemas eléctricos industriales, a través de un programa específico desarrollado para este fin, usando Algoritmos Genéticos (AG), cuyo script fue desarrollado usando instrucciones MATLAB®. La minimización se realiza asignando capacitores shunt conectados a las barras del sistema. La performance se evalúa considerando exactitud y velocidad, y a través de la comparación de sus resultados con los resultados producidos por métodos tradicionales. El método propuesto considera factor de potencia capacitivo en la barra conectada con la empresa distribuidora de energía y el usuario define las barras donde serán instalados los capacitores. La función objetivo para el proceso de optimización del Algoritmo Genético es la pérdida eléctrica de potencia activa total. Para validar el método propuesto se aplica a un sistema eléctrico industrial de 38 barras.

Palabras Claves: Algoritmos Genéticos, Capacitores, Pérdidas eléctricas, Sistema eléctrico industrial.

ABSTRACT

This paper proposes a method to minimize electrical losses in industrial electrical systems, through a specific program developed for this purpose, using Genetic Algorithms (GA), whose script was developed using MATLAB® instructions. The minimization is done by assigning shunt capacitors connected to the system's buses. The performance is evaluated considering accuracy, speed and through the comparison of its results with the results produced by traditional methods. The proposed method considers capacitive power factor in the bus connected to the electricity distribution company and the user defines the buses where the capacitors will be installed. The objective function for the process of optimization of the Genetic Algorithm is the total loss of active power. To validate the proposed method, it is applied to a 38-bar industrial electrical system.

Keywords: Genetic Algorithm, Capacitors, electrical Looses, Industrial Electric Systems.

1. INTRODUCCIÓN

Las redes eléctricas están en la incesante búsqueda de la eficiencia y las empresas involucradas en la transmisión y distribución de energía intentan y buscan nuevas formas para reducir sus pérdidas. Hay decenas de trabajos académicos que tratan de la minimización de pérdidas en redes eléctricas, y ellos difieren, caso por caso, en el tipo de algoritmo, en el dispositivo físico corrector (capacitores, transformadores con tap, etc) y, también, en la forma de cuantificar la mejora.

En cuanto a los dispositivos físicos, algunos estudios [1], [2] y [3] desarrollaron trabajos buscando la minimización de las pérdidas a través de la implantación de capacitores shunt, con y sin inserción de fuentes de energía de generación distribuida; a pesar de la existencia de trabajos optando por la reconfiguración de alimentadores asociados a la generación distribuida [4]. En el caso del dispositivo físico, algunos autores evaluaron solamente los resultados propiciados por la generación distribuida [5], mientras que otros cuantificaron los beneficios consecuentes

* Correspondencia:

E-mail: znauparih@yahoo.es

exclusivamente de la reconfiguración de alimentadores [6].

En cuanto a las estructuras computacionales utilizadas en los estudios, en [1], [3] y [4] las optimizaciones fueron desarrolladas utilizando algoritmos genéticos. Las expresiones numéricas utilizados en los procedimientos de optimización también son diversas: en [4] el estudio se basó en las pérdidas activas, con restricción de potencia de generación distribuida y restricción de tensión; en [1] el estudio consideró el costo de las pérdidas de potencias activas combinado con el costo de capacitores; en [5] el estudio se basó exclusivamente en las pérdidas activas, sin contar con ninguna restricción; en [2] el estudio fue elaborado considerando pérdidas reactivas, también sin contar con cierta restricción; en [3] el estudio fue formulado considerando pérdidas activas, combinando con el costo de generación distribuida, utilizando factores de equilibrio definidos por el propio autor y en [6] el estudio se basó en pérdidas activas considerando únicamente la restricción de tensión.

Existen muchos trabajos académicos considerando el uso de Algoritmos Genéticos para optimización de variables del sistema de transmisión y distribución [7], [8] y [9]. Por otro lado, en sistemas industriales hay un vacío de trabajos académicos, razón por la cual el objetivo de este artículo es cubrir dicho vacío.

2. ALGORITMOS GENÉTICOS Y SUS CONCEPTOS

Charles Robert Darwin desarrolló, en 1858, la "Teoría de la Evolución de las especies". Conforme a esta teoría, todos los organismos vivos están en lento, pero constante proceso de evolución, tendiendo a diferenciarse con el paso de las generaciones. Las poblaciones se diferencian gradualmente, de generación en generación, y cada nueva generación es puesta a prueba por las condiciones del ambiente en que vive. En las nuevas poblaciones los individuos más adaptados al ambiente tienen mayor probabilidad de sobrevivir y de reproducirse. A lo largo del proceso, de vez en cuando, y de forma aleatoria algunas mutaciones pueden ocurrir, mejorando o empeorando las características de los individuos. Al cabo de cierto número de generaciones se tiene como resultado el mejor individuo.

La estructura básica de los Algoritmos Genéticos está representada por la **Figura 1**.

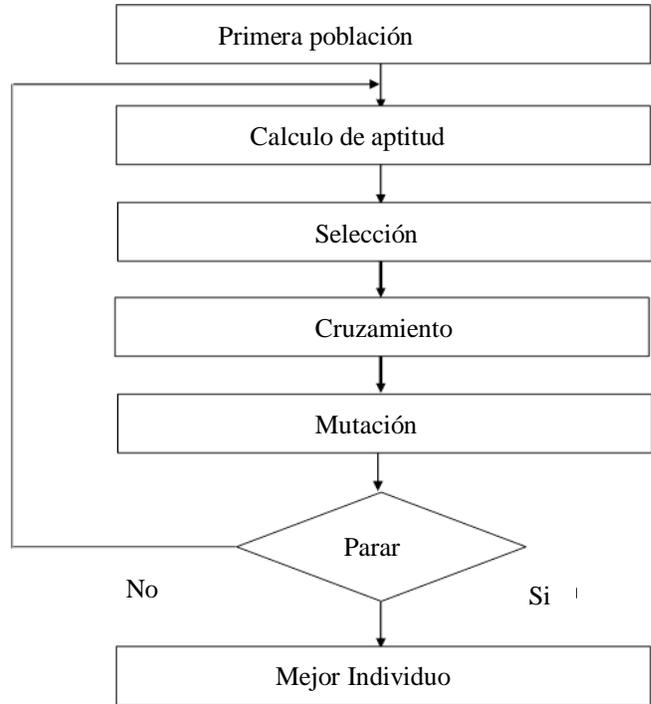


Figura 1: Flujograma de Algoritmos Genéticos Clásico

El Algoritmo Genético funciona de forma iterativa y las etapas de su diagrama de flujo guardan una fuerte similitud con la teoría evolutiva de Darwin; que actúa de la misma forma que la naturaleza lo hace, comprendiendo evaluación, selección, cruce, mutación, actualización y finalización [10]. El diagrama de flujo de la **Figura 3** corresponde a una estructura de AG modificada, incrementada por algunos bloques especiales, cuyo funcionamiento puede ser sintetizado de la siguiente forma:

Los individuos pueden ser representados por números binarios o por números reales. Las formas de selección más comunes son tipo ruleta, ranking y tipo torneo, siendo esta última muy utilizada. Para representación de individuos binarios el cruce más usual es el crossover con uno o más puntos para el intercambio de genes (bits). La mutación cumple papel secundario, pero decisivo, sirviendo para evitar una rápida e indeseable convergencia del algoritmo a mínimos locales. Debe ser pequeño, ya que, de lo contrario, puede deteriorar las poblaciones e inutilizar el resultado de la optimización.

Cuando se busca obtener el valor máximo, el ambiente de evaluación es representado por una ecuación matemática, denominada función objetivo

(FO), siendo el FO de cada individuo el resultado de esta ecuación cuyos valores dependen de las variables contenidas en el individuo.

3. ALGORITMO PROPUESTO

El Algoritmo Genético propuesto, para que pueda presentar buen desempeño cuando se aplica a sistemas eléctricos industriales, contiene además de bloques especiales, las siguientes innovaciones:

- Tabla de capacitores estandarizado: El bloque predispone la tabla de capacitores estandarizados y comerciales,
- Precarga de condensadores: En cada barra que contiene carga reactiva inductiva es automáticamente precargado de un capacitor que anula, o disminuye fuertemente, el reactivo inductivo.
- Doble Penalidad: Opera penalizando violaciones de tensión y de FP (Factor de potencia),
- Mutación adaptativa: permite al algoritmo trabajar con altas tasas de mutación inicialmente y decreciendo con el numero de generaciones,
- Ajuste de carga: Permite simular el nivel de carga del sistema eléctrico, de 50 a 200%,
- Tablas comerciales: permite trabajar con 15 o con 31 diferentes valores de condensadores.

Además de las funciones especiales, el método propuesto brinda al usuario acceso a los parámetros, lo que le permite fácilmente optimizar el desempeño del algoritmo; conciliando velocidad y precisión en el resultado.

Funcion objetivo

La función objetivo es minimizar la pérdida de potencia activa total del sistema. Pero como tenemos que penalizar el factor de potencia FP y los desvios de tensión, estos son introducidos en la función objetivo adicionados de sus factores de penalización. La función objetivo se define por la siguiente expresión:

$$\min \sum_i^{Nl} R_{km} |I_{km}^2| + K2 * \sum_i^{Nb} \Delta V_i + K1 * \sum_i^{Nb} \Delta IFP_i$$

Donde:

$\sum_i^{Nl} R_{km} |I_{km}^2|$: pérdidas eléctricas de potencia;
 $\sum_i^{Nb} \Delta V_i$: Suma de los desvios de tensión;

$\sum_i^{Nb} \Delta IFP_i$: suma de infracciones de factor de potencia
 K1: Penalidad por infracción de factor de potencia;
 K2: Penalidad por desvio de tensión;

3.1. Conceptos y estructura implementados en el algoritmo propuesto

El programa desarrollado en este trabajo, denominado (PAGIND, Programa Algoritmo Genético Industrial), está constituido, según lo esquematizado en la **Figura 2**, por tres diferentes bloques: "RUTINAS FC", "RUTINAS AG" y "RUTINAS DE APOYO".

El bloque "RUTINAS FC" corresponde al programa de cálculo de flujo de carga. Mientras que el bloque "RUTINAS AG" contiene la estructura del "Algoritmo Genético Modificado". El último bloque, referenciado como "RUTINAS DE APOYO", realiza funciones auxiliares (entrada de parámetros, control de los lazos iterativos, organización de resultados e integración de las demás rutinas).

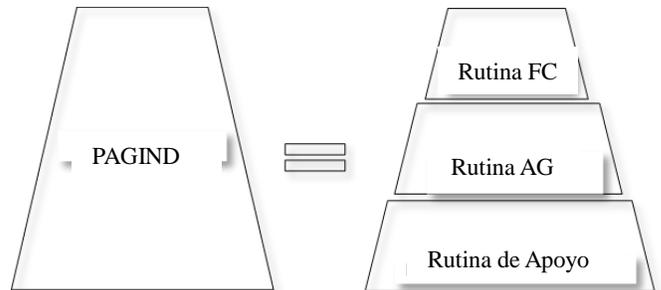


Figura 2: Estructura macro del algoritmo propuesto

El programa desarrollado (PAGIND) utiliza, una estructura, como se muestra en la **Figura 2**, la validación del bloque denominado "RUTINAS DE APOYO", sólo puede ser realizada con el funcionamiento de las demás estructuras del PAGIND. La aplicación tiene como objetivo la minimización de pérdidas eléctricas en sistemas industriales. Adicionalmente, el programa evita, a través de penalizaciones, que la instalación industrial opere, con FP fuera de los límites contractuales (nunca por debajo de 0.92 inductivo y nunca capacitivo) y permite que el usuario, por libre elección, seleccione y decida en qué barras eléctricas no desea la inserción de capacitores. El flujograma del algoritmo propuesto se muestra en la **Figura 3**, donde pueden identificarse las etapas realizadas para obtener la mejor solución.

3.1.1. La población de individuos

la representación binaria fue considerada como la mejor opción para ser implantada en el programa, el número de individuos, esta relacionado con dos factores: demanda computacional y precisión de la respuesta generada por el algoritmo. En la práctica, valores del orden de 50 a 200 individuos resuelven la mayor parte de los problemas de sistemas eléctricos industriales pequeños, sin embargo, poblaciones más grandes pueden ser necesarias en casos más complejos. En los experimentos realizados con el método propuesto la población fue ajustada para operar con 100 individuos, con buenos resultados (precisión y velocidad).

El sistema eléctrico industrial usado para aplicar el método propuesto se muestra en las **Figura 4** y **Figura 5**; que corresponden a un circuito eléctrico industrial de 38 barras, conectado a la red de distribución a través del nivel de tensión 13,8 kV; con cargas alimentadas en 380 V y disponiendo de cuatro subestaciones unitarias, idénticas en todos los aspectos: transformadores idénticos, topología idéntica, misma cantidad de cargas, mismos cables y mismas longitudes de cables. Cada subestación unitaria está constituida por transformador de 1,0 MVA / 3,0%, alimentando 9 barras eléctricas y 6 motores. Los datos de barras y ramas se enumeran respectivamente en las **Tablas 1** y **Tablas 2**, donde Pc = potencia activa de las cargas, Qc = potencia reactiva de las cargas, R (pu) = componente resistivo de la impedancia de la rama y X (pu) = componente reactiva de la impedancia de la rama.

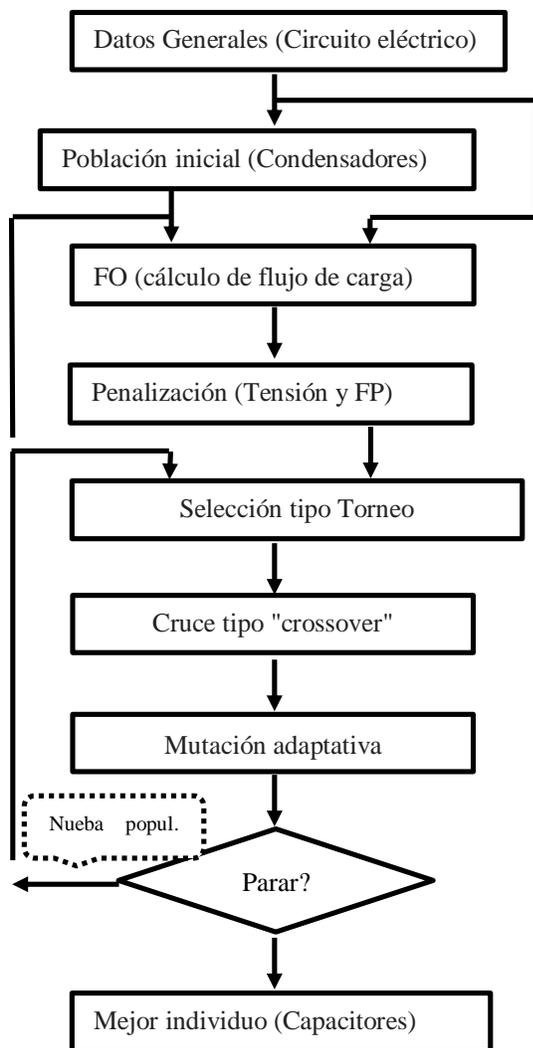


Figura 3: Flujograma del método Propuesto

4. APLICACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO

Tabela 1: Datos das barras do sistema electrico de 38 barras

Barr:	Pc (MW)	Qc (Mvar)	Barra	Pc (MW)	Qc (Mvar)	Barra	Pc (MW)	Qc (Mvar)
1	0,00000	0,00000	8y26	0,00000	0,00000	15y33	0,14710	0,07940
2	0,00000	0,00000	9y27	0,07355	0,05134	16y34	0,29420	0,15879
3y21	0,00000	0,00000	10y28	0,14710	0,07940	17y35	0,00000	0,00000
4y22	0,00000	0,00000	11y29	0,29420	0,15879	18y36	0,07355	0,05134
5y23	0,07355	0,05134	12y30	0,00000	0,00000	19y37	0,14710	0,07940
6y24	0,14710	0,07940	13y31	0,00000	0,00000	20y38	0,29420	0,15879
7y25	0,29420	0,15879	14y32	0,07355	0,05134			

Tabela 2 - Datos dos ramos do sistema elétrico

De	Para	R (pu)	X (pu)	De	Para	R (pu)	X (pu)
1	2	0,122085	0,026858	2	12	0,92	7,4433
2	3	0,92	7,4433	12	13	2,077562	1,385041
3	4	2,077562	1,385041	13	14	48,822714	11,426592
4	5	48,822714	11,426592	13	15	15,581717	10,387811
4	6	15,581717	10,387811	13	16	7,790858	5,193905
4	7	7,790858	5,193905	12	17	2,077562	1,385041
3	8	2,077562	1,385041	17	18	48,822714	11,426592
8	9	48,822714	11,426592	17	19	15,581717	10,387811
8	10	15,581717	10,387811	17	20	7,790858	5,193905
8	11	7,790858	5,193905				
2	21	0,92	7,4433	2	30	0,92	7,4433
21	22	2,077562	1,385041	30	31	2,077562	1,385041
22	23	48,822714	11,426592	31	32	48,822714	11,426592
22	24	15,581717	10,387811	31	33	15,581717	10,387811
22	25	7,790858	5,193905	31	34	7,790858	5,193905
21	26	2,077562	1,385041	30	35	2,077562	1,385041
26	27	48,822714	11,426592	35	36	48,822714	11,426592
26	28	15,581717	10,387811	35	37	15,581717	10,387811
26	29	7,790858	5,193905	35	38	7,790858	5,193905

En todas las simulaciones los ajustes realizados fueron:

- Número de simulaciones = 100;
- Número de individuos = 220;
- Número de generaciones = 25;
- Penalidad por desvío de tensión, $K_2 = 1000$;
- Penalidad por infracción de factor de potencia, $K_1 = 1200$;
- Probabilidad de cruzamiento (%) = 50;
- Probabilidad de mutación porcentual = 5;
- Decremento de mutación porcentual = 100.

Un ciclo de funcionamiento completo del PAGIND, con 25 generaciones, puede ser caracterizado por sus principales variables, conforme se muestra en la **Figura 6** y **Figura 7**; donde se destaca que la mutación utilizada es tipo "adaptativa", iniciando la mutación con 5 % y llegando a 0% al final de las iteraciones.

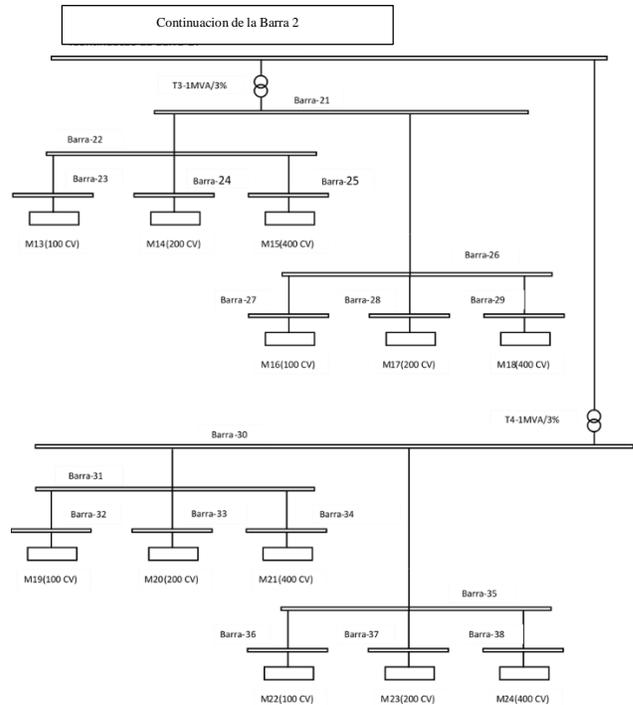


Figura 5: sistema de 38 barras (segunda parte)

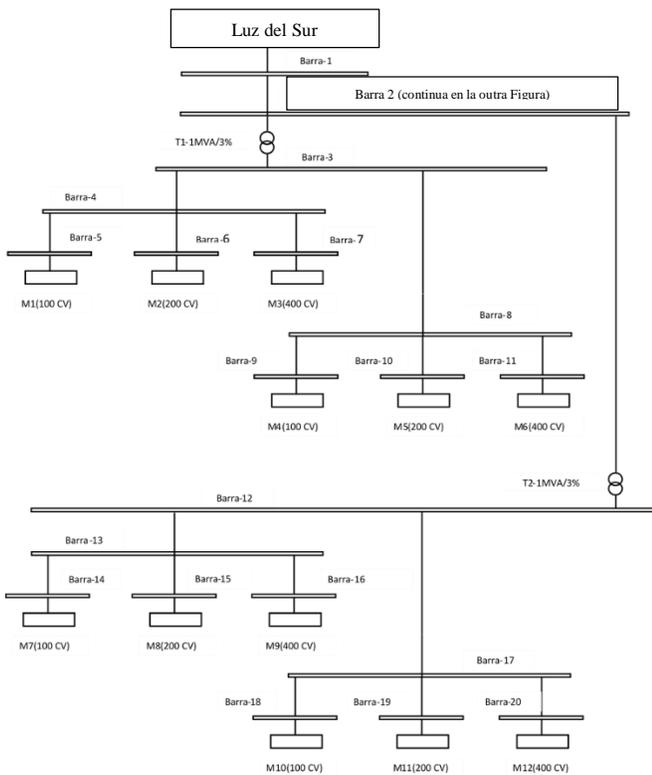


Figura 4: sistema de 38 barras (primera parte)

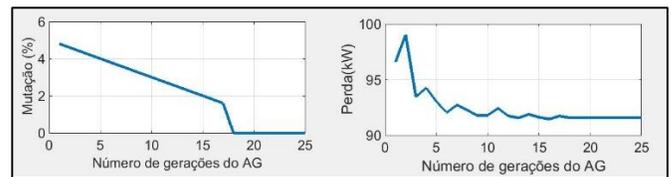


Figura 6: Curva de Mutación adaptativa y pérdidas eléctricas

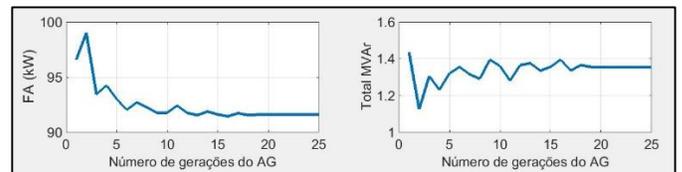


Figura 7: Valor de aptitud y potencia total de capacitores

El programa desarrollado (PAGIND) fue utilizado para hacer 100 simulaciones, estando inhibidas, en todas ellas, instalación de capacitores en la barra número 1. En la primera minimización todos los condensadores fueron forzados a cero y, a partir de la segunda minimización el programa funcionó libremente, sin ninguna variable forzada, realizando las iteraciones en busca del mejor arreglo de capacitores. Cada minimización, con 220 individuos y 25 iteraciones, demandó, aproximadamente, 130 segundos.

Tabla 3: Tensión en las barras, en pu., con y Sin capacitores

Flujo de carga sin capacitores				Optimización, con capacitores					
Barra	Tens. (p.u.)	Barra	Tens. (p.u.)	Barra	Cap. (MVar)	Tens. (p.u.)	Barra	Cap. (MVar)	Tens. (p.u.)
1	1.000	21	0,9776	1	0,000	1	21	0,120	0,9985
2	0,997	22	0,9617	2	0,035	0,9974	22	0,000	0,9866
3	0,9776	23	0,916	3	0,050	0,9978	23	0,050	0,9479
4	0,9617	24	0,9282	4	0,120	0,9866	24	0,120	0,9662
5	0,916	25	0,9282	5	0,060	0,949	25	0,100	0,959
6	0,9282	26	0,9617	6	0,060	0,96	26	0,050	0,9872
7	0,9282	27	0,916	7	0,070	0,9574	27	0,050	0,9485
8	0,9617	28	0,9282	8	0,060	0,9867	28	0,070	0,9616
9	0,916	29	0,9282	9	0,080	0,9512	29	0,140	0,9616
10	0,9282	30	0,9776	10	0,060	0,9601	30	0,120	0,9997
11	0,9282	31	0,9617	11	0,120	0,9601	31	0,040	0,9884
12	0,9776	32	0,916	12	0,030	0,9941	32	0,060	0,951
13	0,9617	33	0,9282	13	0,005	0,9819	33	0,070	0,963
14	0,916	34	0,9282	14	0,050	0,9429	34	0,140	0,963
15	0,9282	35	0,9617	15	0,090	0,9581	35	0,090	0,9885
16	0,9282	36	0,916	16	0,100	0,9541	36	0,050	0,9499
17	0,9617	37	0,9282	17	0,045	0,9824	37	0,050	0,961
18	0,916	38	0,9282	18	0,070	0,9457	38	0,120	0,962
19	0,9282			19	0,050	0,9547			
20	0,9282			20	0,120	0,9557			
Média de Tensión=0,942 p.u.; FP barra 1=0,854				Média de Tensión=0,969 p.u.; FP barra 1=1,000					
Perdida total 242,27 + j*333,51				Perdida total 174,22 + j*239,59					

A pesar de haber realizado 100 minimizaciones, por racionalidad la Tabla 3 registra solamente los resultados del primer y segundo evento. En ella, las columnas identificadas como "Cap." Corresponden al valor de la potencia reactiva capacitiva calculada por el programa, en MVar, e insertada en cada barra; y las columnas identificadas como "Tens." contienen los valores operativos de tensión, en las barras, en p.u. En la penúltima línea, tanto para la primera minimización como para la segunda minimización, se muestran los valores medios de las tensiones de las barras y el FP de la barra 1; y en la última línea se contabilizan los valores correspondientes a las pérdidas totales restantes en las ramas eléctricas

El sistema fue sometido a variación de carga, con excursión en 7 escalones: 50, 75, 100,125, 150, 175 y 200%. Para cada carga se realizaron 100 simulaciones, y los resultados son presentados en las Figura 8 y Figura 9, que son la media aritmética de los resultados obtenidos en las simulaciones; excluyendo la primera, ya que se ejecuta con todas las potencias de los capacitores forzados para el valor nulo.

Como se esperaba, la evolución de la potencia total de los capacitores calculados tiende a una línea recta; mientras que la evolución de las pérdidas sigue una relación cuadrática, y la tendencia de estas dos progresiones sirve para confirmar el perfecto funcionamiento del programa desarrollado; tanto en lo que se refiere a su capacidad de optimización / minimización de pérdidas eléctricas en circuitos eléctricos industriales, cuanto a su capacidad de obedecer las leyes de circuitos eléctricos.

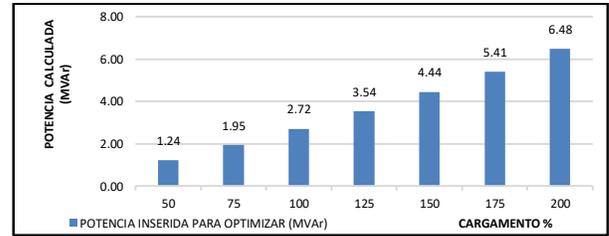


Figura 8: Valor total de la potencia capacitiva calculada con diferentes cargas

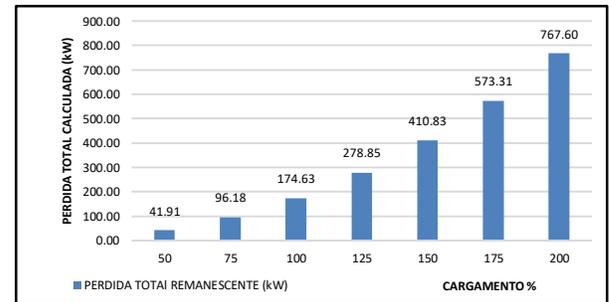


Figura 9: Pérdida eléctrica (kW) calculada con diferentes Cargas

5. PERFORMANCE DEL PROGRAMA DESARROLLADO

Todas las minimizaciones realizadas por PAGIND, y reportadas a lo largo de este trabajo, sirvieron para establecer el performance del programa desarrollado, cuya caracterización está sintetizada en los ítems que siguen.

5.1. Aspectos Positivos del programa desarrollado

- Razonable precisión en el cálculo de pérdidas;
- Buena repetitividad en el cálculo de la potencia total del arreglo de capacitores;
- Inmediata aplicabilidad, determinando solamente capacitores comerciales;

- Fácil identificación de las barras donde no deben instalarse condensadores;
- Total versatilidad, siendo capaz de evaluar sistemas eléctricos industriales en diferentes niveles de carga.

A pesar de los buenos resultados relacionados anteriormente, el programa desarrollado tiene, como limitación, el hecho de no poder imponer el 100% de repetitividad en el valor del capacitor calculado para cada barra.

Este límite se refiere a la característica de la propia estructura del Algoritmo Genético, que tiene un cierto grado de aleatoriedad.

6. CONCLUSIONES

Cuando se aplicó al sistema eléctrico de 38 barras con carga del 100%, el programa promovió una reducción del 28% en las pérdidas de energía y restauró en promedio, el 2.8% del nivel de tensión de las barras.

El programa, cuando fue sometido a variaciones de carga, de 50 a 200%, con intervalos del 25%, no perdió precisión y mantuvo plena funcionalidad, mostrando repetitividad y coherencia con las leyes que rigen los circuitos eléctricos.

Adicionalmente, las simulaciones realizadas mostraron que el programa de cálculo de flujo de carga, usualmente utilizado para el cálculo de redes eléctricas (transmisión y distribución), también se aplica, sin pérdida de rendimiento, y sin ninguna restricción, para cálculos de circuitos eléctricos en la topología industrial.

REFERENCIAS

- [1] D. Das, "Reactive power compensation for radial distribution networks using genetic algorithm," *Electrical Power and Energy Systems*, pp. 573-581, 7 April 1999.
- [2] A. R. Abul'Wafa, "Optimal capacitor allocation in radial distribution systems for loss reduction: A two stage method," *Electric Power Systems Research* 95 (2013) *Electric Power Systems Research*, pp. 168-174, 2013.
- [3] A. Z. ., Y. M. ., M. A. Mohammad H. Moradi, "An efficient hybrid method for solving the optimal siting and sizing problem of DG and shunt capacitor banks simultaneously based," *Electrical Power and Energy Systems* 54 (2014) 101-111 *journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijepes*, pp. 101-111, 2014.
- [4] W. M. D. . H. M. . R. A. . A. H. A. B. . I. Musirin, "Simultaneous Network Reconfiguration and DG Sizing Using Evolutionary Programming and Genetic Algorithm," *RESEARCH ARTICLE - ELECTRICAL ENGINEERING*, p. 6328/6338, *Arab J Sci Eng* (2014) 39:6327-6338 DOI 10.1007/s13369-014-1299-9 2014.
- [5] D. M. S. a. I. S. S. Q. A. SALIH, "Optimal Distributed Generators Location For Power Losses Improvement Using Sensitivity Based Method," em *IEEE International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA)*, Putrajaya, Malaysia, 2015.
- [6] C.-S. L. Ching-Tzong Su, "Feeder reconfiguration and capacitor setting for loss reduction of distribution systems," pp. 97-102, 2000.
- [7] K. R. D. P. K. K.R. Devabalaji, "Optimal location and sizing of capacitor placement in radial distribution system using Bacterial Foraging Optimization Algorithm," *Electrical power & energy systems (journal)*, pp. 383-390, 17 March 2015.
- [8] M. J. K. Z. Sayyad Nojavan, "Optimal allocation of capacitors in radial/mesh distrib. systems using mixed integer nonlinear programming," *Electric Power Systems Research*, pp. 129-124, 29 September 2013.
- [9] A. Y. A. Attia A. El-Fergany, "Capacitor placement for net saving maximization and system stability enhancement in distrib. net. using artificial bee colony-based approach," *Electrical Power and Energy System*, pp. 235-243, 1 July 2013.
- [10] J. HOLLAND, *Adaptation in natural and artificial systems*, 1975.
- [11] M. R. H. Malik, "Genetic algorithm-based approach for fixed and switchable capacitors placement in distribution systems with uncertainty and time varying loads," in *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2007.
- [12] D. Das, "Reactive power compensation for radial distribution networks using genetic algorithm," *Electrical power & energy systems*, 8 August 2001.
- [13] Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structures=Evolution Programs*, Charlotte, 1996.



Los artículos publicados por TECNIA pueden ser compartidos a través de la licencia Creative Commons: CC BY 4.0 Perú. Permisos lejos de este alcance pueden ser consultados a través del correo revistas@uni.edu.pe

Z. Ñaupari, et al.