

**COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS TÉCNICAS
DE ENERGÍA EMPLEANDO RECONFIGURACIÓN EN SISTEMAS DE
DISTRIBUCIÓN RADIAL**



**JIMMY ALBERTO SUAREZ GIL
DANILO ANDRES PIÑEROS GUARNIZO**

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
BOGOTÁ D.C.
2016**

**COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS TÉCNICAS
DE ENERGÍA EMPLEANDO RECONFIGURACIÓN EN SISTEMAS DE
DISTRIBUCIÓN RADIAL**

**JIMMY ALBERTO SUAREZ GIL
DANILO ANDRES PIÑEROS GUARNIZO**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Electricista**

**Director
Andrés Felipe Panesso Hernández, M.Sc.
Profesor Asistente**

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
BOGOTÁ D.C.
2016**

Nota de Aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C., Septiembre de 2016.

*Dios por permitir finalizar mi proyecto de grado y terminar esta etapa académica,
llenándome de sabiduría y capacidad que me brindó a diario.*

*A mis padres, Alberto Suarez, Clemencia Gil que, gracias a su dedicación, esfuerzo y
mucho amor que me brindaron todo su apoyo y nunca me abandonaron en las etapas de
mi vida, con sus sacrificios lograron que terminara esta etapa.*

*A mi hermana, Gina Suarez Gil por su paciencia y apoyo incondicional y brindarme
mucho sabiduría en todos los aspectos de mi vida.*

*A mi novia, Andrea Montés Moreno, que, gracias a su apoyo, paciencia y mucho
esfuerzo me acompañó en todas mis metas y así acompañarme en esta etapa académica.*

*A mis tías, Claudia Suarez, Mercedes Gil, Luz Marina Gil por su gran apoyo
incondicional.*

A mis amigos de estudio por darme momentos y alegrías inolvidables en mi etapa final.

Jimmy

Gracias a Dios por darme vida cada día y con esto poder disfrutar de mis logros y mis metas.

Gracias a mis padres, Danilo Piñeros y Nadezda Guarnizo, que gracias a su esfuerzo, motivación y amor que me ofrecieron incondicionalmente he podido recorrer los largos caminos de la vida y lo que esto conlleva, que siempre han estado apoyándome y ayudándome a alcanzar cualquier meta que me proponga.

Gracias a mi hermano, Juan Felipe Piñeros Guarnizo por su alegría, por su apoyo y sus grandes ayudas que me brindó en cualquier momento que necesité.

Gracias a mi novia, Laura Cecilia Vargas, que estuvo presente en gran parte de mi carrera y en todo ese tiempo siempre fue un pilar, un apoyo, una persona con la que siempre podía contar, por que siempre hasta de lo más malo sacaba lo mejor a relucir.

Gracias a la universidad, a las directivas, a los docentes por forjarme desde que ingresé, en especial quiero agradecer a nuestro tutor, el ingeniero Andrés Panesso, porque impulsarnos en esta dura etapa final, por colaborarnos en cualquier momento y con cualquier inquietud, por ayudarnos a crecer como personas, por su gran paciencia y porque a pesar de ser un docente, creo que se forjó una amistad.

Gracias no solo a mi núcleo familiar sino también a mi familia extendida, ya que tanto tío, tías, primos, primas, abuela y todo tipo de parientes siempre estuvieron apoyándome y corrigiéndome de la mejor manera dependiendo de la situación.

Gracias a mis amigos de estudio, en especial a Jesús Cubillos, porque todos ustedes fueron apoyos incondicionales y por los momentos que vivimos dentro y fuera de la institución ya que estas fueron alegrías inolvidables en esta etapa de universidad, También quiero hacer un reconocimiento a un gran compañero como lo fue Rodolfo Montenegro, a quien tuve la grandiosa oportunidad de conocer desde el primer semestre, compartir muchos momentos inolvidables y que lastimosamente el día de hoy ya no se encuentra con nosotros.

Danilo

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos primero a Dios por darnos la sabiduría y otorgarnos un nuevo día para culminar nuestras metas.

Gracias a la exigencia y dedicación del ingeniero Andrés Felipe Panesso por insistirnos en esforzarnos y brindarnos múltiples perspectivas en el proyecto. Sus reflexiones y comentarios nos permitieron dar cuenta de la riqueza de los relatos obtenidos. Encontramos en ustedes unos importantes aliados para no perder el interés y para comprender que las reevaluaciones son caminos para llegar a claridades e ideas más contundentes.

A nuestras familias por enseñarnos que los verdaderos retos son mentales y requieren un esfuerzo desde el amor propio y la planeación de metas.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
I. Introducción	10
II. Modelo matemático general	11
III. Metodología	11
A. Método heurístico.....	11
B. Método metaheurístico.....	12
C. Método exacto.....	13
D. Método de Monte Carlo	13
IV. Simulaciones y análisis de resultados	14
A. Método heurístico.....	14
B. Método metaheurístico.....	14
C. Método exacto.....	15
D. Simulación de Monte Carlo	15
E. Comparación de los métodos	16
V. Conclusiones	16
VI. Recomendaciones	17
VII. Referencias	17
ANEXO A	18
ANEXO B	19
ANEXO C	21

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla I. Resultados de la programación del método heurístico	14
Tabla II. Características de la población inicial	14
Tabla III. Resultados de reconfiguración con AG básico.	15
Tabla IV. Resultados de reconfiguración con el método exacto.....	15
Tabla V. Resumen de resultados de la simulación de Monte Carlo.....	15
Tabla VI. Cuadro comparativo de las simulaciones realizadas.....	16
Tabla VII. Tabla de datos del sistema de prueba	18
Tabla VIII. Perfiles de tensión obtenidos para los diferentes métodos.....	21

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de flujo para el método de intercambio de rama simple.	12
Figura 2. Diagrama de flujo para procedimiento para el algoritmo genético.	13
Figura 3. Diagrama de flujo para procedimiento para el método exacto.	13
Figura 4. Sistema de prueba IEEE de 33 barras.	14
Figura 5. Reconfiguración óptima usando el método heurístico.	14
Figura 6. Reconfiguración óptima usando el AG básico.	15
Figura 7. Reconfiguración óptima usando el método exacto.	15

Comparación de métodos de reducción de pérdidas técnicas de energía empleando reconfiguración en sistemas de distribución radial

Jimmy Alberto Suarez Gil, Danilo Andrés Piñeros Guarnizo

Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia

Resumen— Existen diferentes métodos de optimización que pueden ser utilizados para la reducción de las pérdidas técnicas de energía en los sistemas de distribución radial, es así como a través de este artículo se lleva a cabo una comparación de tres de estos diferentes métodos para reducir las pérdidas, tales como: uno heurístico, uno metaheurístico y uno exacto. Los métodos de optimización son programados en el software Matlab® con la ayuda del paquete Matpower V3.2 para la solución de flujos de carga, y con el cual se realizan simulaciones para el sistema de prueba de 33 nodos del IEEE, para cada uno de los métodos a fin de encontrar cuál es el más apropiado para su aplicación teniendo en cuenta la reducción de las pérdidas de energía mediante la reconfiguración de la red, el tiempo de cómputo y el número de iteraciones.

Palabras clave— Reconfiguración, Reducción de pérdidas, Sistema de distribución radial, Técnicas de optimización.

Abstract — In this paper we show a comparison between three different methods for power losses reduction such as: heuristic, metaheuristic and exact technique. There are different optimization methods for reducing energy losses in radial distribution systems and could be used in the reconfiguration network problem. Simulations were made in Matlab® software for IEEE 33-bus test system and using Matpower V3.2 which is a package of Matlab® M-files for solving power flow. Each one of methods were programmed in order to find what is the most suitable for its implementation in the reconfiguration networks problem taking in account the power losses reduction, computational time and number of iterations.

Keywords— Energy losses reduction, Network reconfiguration, Optimization methods, Radial distribution system.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de distribución de energía eléctrica se encargan de llevar la energía desde las subestaciones de transmisión hasta los usuarios finales. Por eso debe existir un control a través de estas etapas donde cualquier falla puede originar pérdidas tanto para la empresa como para los usuarios finales. Hoy en día los procesos en los sistemas de distribución son detalladamente estudiados y planificados para una mejor calidad de servicio.

Los sistemas de distribución son operados de forma radial, lo que facilita la coordinación de protecciones; sin embargo, estos sistemas son diseñados con una topología mallada (abierta), para ejecutar procesos de mantenimiento, balancear cargas, e inclusive minimizar pérdidas, presentando considerables ventajas.

La reconfiguración consiste en alterar la topología en los sistemas de distribución de energía eléctrica por medio de la apertura o cierre de interruptores. Este proceso se realiza para la restauración del servicio, balancear cargas, compensación de reactivos, también se formula para encontrar una topología de operación radial que pueda minimizar las pérdidas de potencia del sistema cumpliendo restricciones de operación, que es objetivo de este trabajo. Todo depende el problema que se plantee.

El problema de la reconfiguración de un sistema de distribución se ha abordado a través de métodos de optimización. Merlin y Back por primera vez proponen el problema de reconfiguración implementando un método heurístico constructivo minimizando las pérdidas de potencia como función objetivo, incluyendo restricciones operativas [1]. Esta metodología tuvo una modificación propuesta por Shirmohammadi y Hong en [2], donde se simula un flujo de carga óptimo con los interruptores totalmente abiertos y se repite el proceso esta vez con los interruptores cerrados lo que permite observar una menor corriente. Luego, McDermott, Drezga y Broadwater realizan un algoritmo que permite que cada etapa de flujos de potencia minimice las pérdidas totales [3]. Por otro lado, Baran y Wu proponen una expresión algebraica que estima la minimización de pérdidas por la alteración de topología del sistema, también proponen una metodología heurística de reconfiguración que balancea cargas y reduce pérdidas en los alimentadores [4]. López y Gallego plantearon que por medio del método del gradiente se busca reducir las pérdidas en un sistema de potencia, este consiste en ajustar unas variables de control, en donde se identifica un

punto de operación que minimice las pérdidas de potencia activa, este método soluciona el flujo de potencia por medio del método de Newton-Rapshon y los límites de las variables independientes son manejados mediante funciones de penalidad [5]. Anaut, Di Mauro, Meschino y Suarez optimizaron las redes eléctricas de distribución utilizando algoritmos genéticos con el objetivo de minimizar las pérdidas por efecto Joule [6]. En cambio, González, Quintero, Mesa y Kandjunglume utilizaron un método heurístico de intercambio de rama simple donde se calculan las pérdidas de potencia operando dos interruptores a la vez, es decir, abriendo uno y cerrando el otro al mismo tiempo y simulando un flujo de carga para todas las posibles configuraciones [7]. Finalmente, Rodríguez y Vargas propusieron un método heurístico que usa la lógica difusa y disminuye el tiempo de restauración de servicio [8].

Los métodos adaptados en este trabajo son conocidos como: Intercambio de rama simple - método que se encuentra dentro de los denominados métodos heurísticos, Algoritmo Genético (AG) - método denominado metaheurístico, y finalmente Newton multidimensional combinado con gradiente óptimo - como método exacto. A partir de dichos métodos, se desarrollaron aplicaciones a problemas de optimización, como función objetivo que es minimizar pérdidas satisfaciendo las restricciones de tensión, corriente y radialidad, adaptándolo a un sistema de 33 nodos del IEEE y solucionando los flujos de carga usando el paquete Matpower V3.2 [9].

II. MODELO MATEMÁTICO GENERAL

El modelo matemático general para resolver el problema de la reducción de las pérdidas de energía en el sistema de prueba se plantea en las ecuaciones (1) a (6), de acuerdo a lo presentado en [7] para la reconfiguración de redes de distribución.

$$\min f(x) = Losses = \sum_{a=1}^n \lambda \times I_a^2 \times R_a \quad (1)$$

Sujeto a:

$$|I_a| < I_{max} \quad (2)$$

$$V_{min} < |V_a| < V_{max} \quad (3)$$

$$\sum_{\Omega_k \in j} I_k = 0 \quad (4)$$

$$\sum_{\Omega_k \in i} V_k = 0 \quad (5)$$

$$\varphi(k) = 0 \quad (6)$$

Donde:

I_a : Corriente a través de la rama a .

I_k : Corriente de la rama k -ésima entrante a la barra j .

R_a : Resistencia de la rama a .

V_a : Tensión en la barra a .

V_k : Tensión de la rama k -ésima en el anillo i .

$\varphi(k)$: Restricción de radialidad.

λ : Variable binaria que indica la conexión del elemento.

n : Número total de ramas en el sistema.

Ω_k : Conjunto de los k elementos conectados a la barra j o pertenecientes al anillo i .

Puede notarse fácilmente que las ecuaciones (4) y (5) corresponden a restricciones dadas por las leyes de Kirchhoff de corriente y tensión, respectivamente. La ecuación en (6) se plantea de diferentes formas en los programas realizados para cada método.

III. METODOLOGÍA

Se elige un método de optimización de cada uno de los diferentes tipos para la minimización de pérdidas como son los métodos heurísticos, metaheurísticos y exactos. Para el caso de los métodos heurísticos se realiza la minimización de pérdidas mediante la reconfiguración de la red utilizando el intercambio de rama simple presentado en [7], para los métodos metaheurísticos se utiliza el algoritmo genético básico presentado en [10] y [11], y para el caso de los métodos exactos se realiza en dos fases, la primera mediante el método de gradiente óptimo y se finaliza con el método de Newton multidimensional, ambos tomados de [12].

A. Método heurístico

La reconfiguración mediante el intercambio de rama simple es un método que básicamente cierra un interruptor de los que ya están propuestos en el sistema de prueba y a su vez abre otro interruptor para evitar que el sistema pierda su topología radial y a esta nueva configuración realizarle el flujo de carga para calcular sus pérdidas, y hacerlo así sucesivamente para las opciones de interruptores a cerrar.

La ventaja de utilizar el método de intercambio de rama simple es que su programación es sencilla en comparación de los otros métodos programados para esta evaluación, y como es basado en la experiencia del operador entonces las opciones de resultado serán redes radiales en su gran mayoría [7]; La desventaja es que consume mucho tiempo analizar todas las posibles variantes y que su solución dependerá siempre de su estado inicial.

Para la programación del método de intercambio de rama simple se siguen los pasos presentados en el diagrama de flujo de la Figura 1.

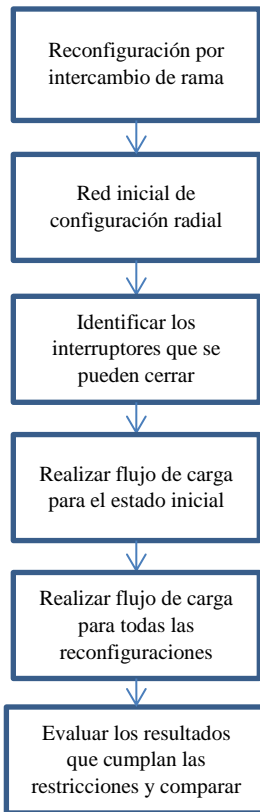


Figura 1. Diagrama de flujo para el método de intercambio de rama simple.

B. Método metaheurístico

La reconfiguración mediante el método del algoritmo genético, como método metaheurístico seleccionado, se resuelve por medio de una serie de procesos, similares a los que se observan en la evolución biológica de las especies y que permiten solucionar diversos problemas, dichos procesos se describen de esta manera.

Población:

La población son el conjunto de individuos con los cuales se trabaja el algoritmo genético. Los individuos para el caso de esta evaluación son 50 cromosomas, que constituyen varias combinaciones de ramas abiertas y cerradas del problema. Estos individuos durante el funcionamiento del algoritmo van cambiando, pero el tamaño de la población nunca cambia.

Para un mejor manejo de este algoritmo se emplea la codificación binaria, que son 0 y 1, que simula el comportamiento del individuo, en este caso abre o cierra el interruptor respectivamente, y así para la validación de la

población se usó la función de adaptación que haga que los resultados se puedan encontrar en un rango permitido.

Para generar la población inicial se corren flujos de carga, adaptándole una serie de restricciones como límites de tensión en las barras, límites de corriente por las ramas y la restricción de radialidad.

Función de adaptación:

Es una herramienta que permite regular que tan buena sea la solución. Si el individuo no se adapta a la función no se tendrá en cuenta en la población. En la ecuación (7) se presenta la función de aptitud o “fitness” utilizada para el problema de la minimización de pérdidas mediante reconfiguración.

$$Fitness(x) = F.O. + \sum (v_g \times 500) \quad (7)$$

Donde v_g son las posibles configuraciones que presentan infactibilidad del sistema y así la creación del fenotipo. Ese escoge el número 500 porque es suficientemente grande como para empeorar aún más los valores de las soluciones infactibles.

Para esperar un mejor desempeño del algoritmo genético, se genera una población inicial con gran porcentaje de efectividad. Para esto fue necesario, dividir la población inicial con un 20% de datos heurísticos construidos a partir de soluciones factibles y con pérdidas lo más pequeñas posibles o cercanas al caso original, y el 80% restante se deja totalmente aleatorio.

Selección:

En este proceso, se seleccionan los individuos que integran las parejas que se van a reproducir, todos los individuos son capaces de participar en la formación de las parejas. La selección es totalmente al azar, y el método al usar es por ruleta. Se asigna un valor de probabilidad a cada individuo, que depende de su fenotipo y que la suma de todas las probabilidades de todos los individuos sea uno, este fenotipo se obtiene usando la función de aptitud, donde los mejores individuos van a tener una mayor probabilidad de ser seleccionados.

Los individuos con mayor probabilidad son seleccionados para conformar el padre número 1 luego se repite el proceso para determinar el padre número 2, donde los padres sean distintos, estos padres son seleccionados para la parte de recombinación.

Cruzamiento:

El cruzamiento consiste en el intercambio genético de los padres que se seleccionaron. Solo el 80 % de los cromosomas tendrá la posibilidad de cruzamiento, este porcentaje se toma con base en la recomendación dada en [11].

Mutación:

El proceso de la mutación, es seleccionado de forma aleatoria partiendo del hijo que fue resultado del cruzamiento. Para este caso solo el 1% de la muestra puede mutar, y se evalúa gen por gen, con una población de 50 cromosomas y se itera el algoritmo genético a través de 20 generaciones.

Para la programación del algoritmo genético se siguen los pasos presentados en el diagrama de flujo de la Figura 2.

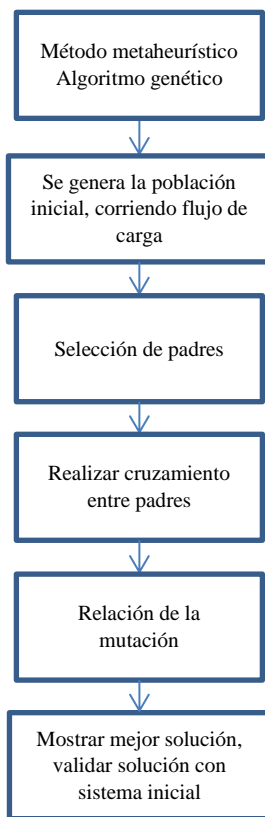


Figura 2. Diagrama de flujo para procedimiento para el algoritmo genético.

C. Método exacto

La reconfiguración mediante el método exacto consta de dos partes para encontrar el punto en el cual se minimiza la función. Se trata de utilizar el método del gradiente óptimo hasta que alcance una convergencia determinada y luego se utiliza el método de Newton multidimensional para encontrar la respuesta de una manera rápida.

Cabe resaltar que para los métodos de programación no lineal las restricciones se deben colocar de forma distinta, entonces para el método exacto las restricciones se establecieron por métodos de función de penalidad [12], y por esto a la función objetivo se le adiciona la penalidad. En la ecuación (8) se muestra la ecuación (1) adaptada a las penalidades por incumplimiento de restricciones. Puede notarse que se presenta como una función irrestricta lo que facilita su programación.

$$\min f(x) = Losses = \sum_{a=1}^n I_a^2 \times R_a - \min \left\{ 0, \sum (v_g \times 500) \right\} \quad (8)$$

A diferencia del caso del algoritmo genético, v_g puede ser diferente de cero, pero cuando ésta alcance la infactibilidad, v_g será un número negativo por lo que la función objetivo se incrementaría haciendo menos atractiva esta topología.

Se seguirán los pasos del diagrama de flujo de la Figura 3 para la programación del método gradiente óptimo y Newton multidimensional.

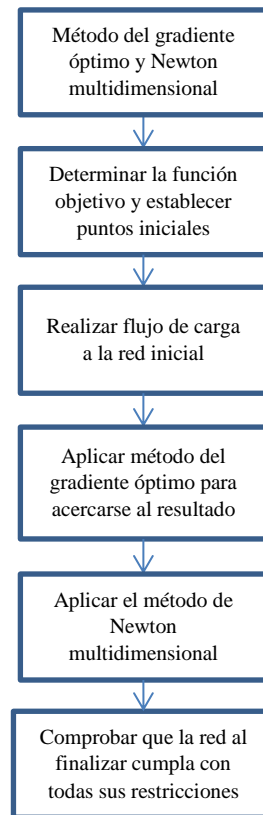


Figura 3. Diagrama de flujo para procedimiento para el método exacto.

D. Método de Monte Carlo

El método de Monte Carlo consta de realizar reconfiguraciones aleatorias y luego a cada una de ellas

aplicarle el flujo de carga para conocer las pérdidas totales del sistema, también la tensión en los nodos y las corrientes que circulan a través de las ramas. Después de conocer toda la información de cada reconfiguración aleatoria, se realiza la selección de las reconfiguraciones aleatorias que cumplan las restricciones de tensión, corriente y radialidad antes ya mencionadas. Y por último simplemente se identifica la mejor reconfiguración para luego realizar su comparación.

IV. SIMULACIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Figura 4 se observa la topología del sistema IEEE de 33 nodos [13], que es utilizado para la comparación de los tres métodos de reconfiguración. El sistema de prueba consta de 33 nodos, 32 líneas cerradas y 5 líneas abiertas. Las pérdidas de potencia originales para este sistema en [13] son de 211.22 kW. Cabe resaltar que para este sistema todas las líneas pueden tener apertura o cierre.

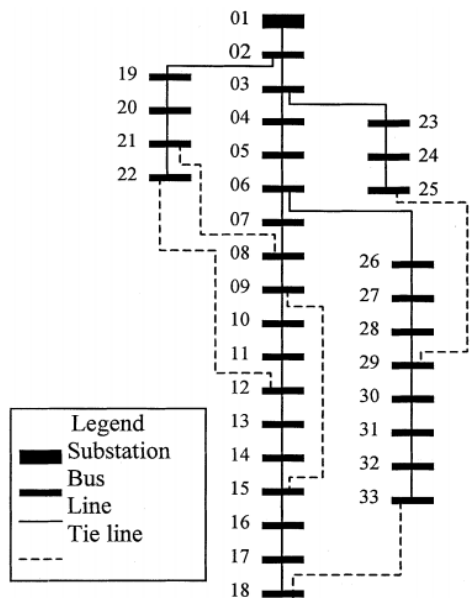


Figura 4. Sistema de prueba IEEE de 33 barras.

En el Anexo A, se puede observar los datos del sistema de prueba, como la resistencia y reactancia de las líneas o las cargas en los nodos receptores. Adicionalmente, en el Anexo B se muestra el sistema de prueba utilizado en Matpower V3.2.

A. Método heurístico

El método de intercambio de rama simple es un método sencillo de programar y todas las opciones de resultados fueron de forma radial. Las pérdidas del sistema inicial fueron de 211.0 kW y al realizar el método de intercambio de rama simple las mínimas pérdidas fueron reducidas a 144.4 kW, es decir una reducción del 31.56%.

Tabla I. Resultados de la programación del método heurístico

Sistema	Rama abierta	Rama cerrada	Pérdidas totales [kW]	Cumple restricción de tensión	Cumple restricción de corriente
Inicial	-	-	211.0	Si	Si
Reconf 1	9	34	202.6	Si	Si
Reconf 2	28	37	177.8	Si	Si
Reconf 3	20	33	235.7	No	Si
Reconf 4	7	33	144.4	Si	Si
Reconf 5	11	35	153.5	Si	Si
Reconf 6	25	36	612.9	No	No

Como se observa en la Tabla I, en este método las reconfiguraciones que no cumplen con las restricciones de regulación de tensión o de corriente máxima por los conductores son el 3 y el 6. Además, en los casos que sí cumple la reducción de pérdidas fue considerable.

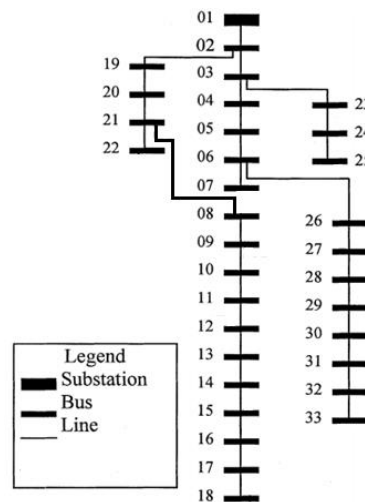


Figura 5. Reconfiguración óptima usando el método heurístico.

En la Figura 5 se puede observar el sistema óptimo que resultado de la simulación del método heurístico y que cumple con las restricciones antes propuestas.

B. Método metaheurístico

Teniendo en cuenta las características del sistema de prueba y su codificación para el algoritmo genético, se utilizan los parámetros de configuración enunciados en la parte III.B, los cuales se muestran en la Tabla II.

Tabla II. Características de la población inicial

Número máximo de iteraciones	20
Probabilidad de recombinación	80 %
Probabilidad de mutación	1 %
Población inicial	50 individuos
	37 genes/cromosoma

En la Tabla III, se evidencian que las mínimas pérdidas con este método son de 132.4 kW, y su porcentaje de reducción en comparación con el sistema inicial es de 37.25%.

Tabla III. Resultados de reconfiguración con AG básico.

Ramas abiertas	Pérdidas totales [kW]	Reducción de pérdidas [%]
Inicial	211.0	-
8 - 10 - 15 - 27 - 33	132.4	37.25

Claramente se evidencia en la Tabla III, que las pérdidas obtenidas son menores a las halladas con el método heurístico, una de las posibles razones por la que se presenta esta mejora es la posibilidad de exploración que ofrecen estos métodos desde la aleatoriedad de las configuraciones en la población inicial, es decir que, si se inicia siempre con los mismos individuos, la probabilidad de encontrar mejores soluciones se reduce.

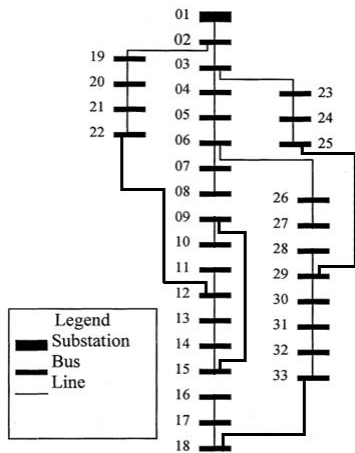


Figura 6. Reconfiguración óptima usando el AG básico.

En la Figura 6, se comprueba que hubo una apertura en las ramas (8, 10, 15, 27, 33) y además se cumplen todas las restricciones implementadas y el sistema sigue siendo radial.

C. Método exacto

Finalmente, se realiza este proceso de minimización de pérdidas de potencia mediante reconfiguración de la red utilizando el método exacto, cuya descripción fue detallada previamente.

Tabla IV. Resultados de reconfiguración con el método exacto.

Ramas abiertas	Pérdidas totales [kW]	Reducción de pérdidas [%]
Inicial	211.0	-
7 - 9 - 12 - 19 - 27	261.0	-23.70

El método de gradiente óptimo y Newton multidimensional es un método especializado para variables continuas; en este caso al tener variables enteras binarias, el método se hace muy inadecuado para su uso ya que como se puede observar en la Tabla IV, las pérdidas iniciales del sistema eran de 211.0 kW,

y al realizar la programación y aplicación de este método, las pérdidas ascienden a 261.0 kW.

El uso de este método se recomienda para variables continuas ya que como se pudo observar a través de la programación y aplicación, no es nada eficiente para este caso particular.

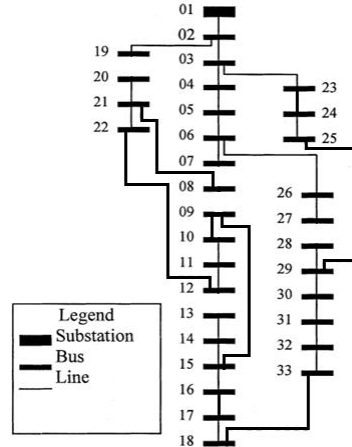


Figura 7. Reconfiguración óptima usando el método exacto.

En la Figura 7 se observa el sistema óptimo utilizando el método híbrido para el problema planteado.

D. Simulación de Monte Carlo

El método de simulación de Monte Carlo se realizó simplemente para una comprobación de los mejores resultados que se podrían obtener de los distintos tipos de reconfiguraciones. Este método lo que busca es generar reconfiguraciones de manera aleatoria y luego realizarle el flujo de carga y se tiene en cuenta sólo las que cumplieran las restricciones del sistema ya anteriormente descritas en la Sección II. Estas simulaciones se realizaron para observar si aleatoriamente se podrían identificar mejores resultados de reconfiguración para este tipo de problema.

Se realizó la evaluación logrando reducir las pérdidas hasta 123.1 MW satisfaciendo las restricciones de operación del sistema, aunque el tiempo de simulación para esta comprobación fue de 18 horas y 46 minutos. Los resultados para las configuraciones observadas se presentan en la Tabla V.

Tabla V. Resumen de resultados de la simulación de Monte Carlo.

Número de reconfiguraciones evaluadas	Tiempo de simulación [s]	Pérdidas [kW]	Reducción de pérdidas [%]
20	58.45	148.2	29.76
50	94.95	141.0	33.18
100	212.91	128.8	38.96
5000	25926.96	125.4	40.57
10000	67594.32	123.1	41.66

La reducción de pérdidas porcentual es presentada en la **Error! Reference source not found.** en donde la reducción de pérdidas es calculada con base a las pérdidas del sistema en su configuración inicial, como se muestra en la ecuación (9).

$$Reducción[\%] = \frac{Pérdidas_{iniciales} - Pérdidas_{finales}}{Pérdidas_{iniciales}} \times 100\% \quad (9)$$

No hubo una preferencia en los diferentes resultados, aunque se puede observar que existe en una similitud entre ellos, omitiendo la cantidad de reconfiguraciones que se hayan simulado. La desventaja de este tipo de simulaciones es lo que lo hace robusto, es decir su aleatoriedad, dado que al tener que verificar la satisfacción de las restricciones en cada configuración presentada el tiempo de simulación se extiende con el número de iteraciones.

E. Comparación de los métodos

Para realizar el análisis adecuado entre los métodos, en la Tabla VI se encuentran las mínimas pérdidas del sistema por método, las ramas abiertas, la reducción de pérdidas y el tiempo de simulación para cada método, son también presentados.

Tabla VI. Cuadro comparativo de las simulaciones realizadas.

Método	Pérdidas [kW]	Ramas abiertas	Reducción de pérdidas [%]	Tiempo de simulación [s]
Rama Simple	144.4	7 - 34 - 35 - 36 - 37	31.56	4.65
Algoritmo Genético	132.4	8 - 10 - 15 - 27 - 33	37.25	23.82
Método exacto	261.0	7 - 9 - 12 - 19 - 27	-23.70	35.63
Monte Carlo	123.1	6 - 23 - 33 - 34 - 35	41.66	67594.32

En la Tabla VI también se puede apreciar que las menores pérdidas obtenidas son las de la reconfiguración con Monte Carlo y su reducción fue del 41.66%, pero al momento de comparar los tiempos, Monte Carlo es el método con tiempos mayores con más de 18 horas de simulación, por esta razón, este método no se considera el óptimo para su realización. Por otro lado, se puede observar que el método de algoritmo genético alcanzo una reducción de pérdidas del 37.25%, y su tiempo de simulación fue de 23.82 segundos, tiempo que es corto en comparación con el método de Monte Carlo.

El intercambio de rama simple alcanzo una reducción de pérdidas del 31.56%, igualmente esta reducción es buena y su tiempo de simulación fue el más corto de todos con 4.65 segundos, por esta razón, aunque no fue el método que redujo más pérdidas, el método es muy bueno para este tipo de soluciones por su corto tiempo de simulación.

Para el caso del método exacto, el método no redujo pérdidas, sino que por el contrario las aumentó un 23.70%, debido en parte a que las variables no son continuas y en este caso tenemos variables enteras-mixtas. Se seleccionó este método híbrido ya que el tiempo de simulación normalmente es corto en comparación con técnicas más sofisticadas y éste para alcanzar el punto mínimo, llega con pocas iteraciones, aunque con otro método de solución exacto se podrían haber alcanzado mejores resultados teniendo en cuenta el tipo de variables a utilizar.

V. CONCLUSIONES

Se encontró que, en comparación de los tres métodos usados para la reducción de pérdidas, el método óptimo en este caso fue el método metaheurístico de algoritmo genético. Además, se evidencia que con el método de simulación de Monte Carlo las pérdidas podrían ser menores en comparación de los tres métodos propuestos pero el tiempo de simulación podría ser exageradamente alto.

Se observó que el método heurístico para este tipo de problemas es un método en el cual el tiempo de programación de la simulación es el más bajo y además la reducción de pérdidas es considerable, por esta razón, este método, aunque no es el que más pérdidas logró reducir, es bastante bueno en relación con el tiempo de programación y las pérdidas reducidas.

Se encontró también que el tiempo de cómputo de los tres métodos simulados es bastante corto y adecuado para cualquier tipo de análisis. Adicionalmente, se identificó que el método exacto como se planteó, no es bueno para este tipo de problemas ya que éste se realizó con una técnica apropiada para programación no lineal y se especializa en variables continuas, en este caso, las variables son de tipo entero binario, por lo que al momento de su realización las pérdidas resultantes son incluso mayores a las pérdidas del sistema inicial.

De igual forma se evidencia que los tres métodos programados se utilizan para obtener una solución óptima a partir de las reconfiguraciones usando el mayor número de líneas abiertas del sistema inicial (líneas discontinuas de la Figura 4), y se debe a que éstos presentan una resistencia de 0 ohmios (ver Tabla VII, Anexo A) y, por ende, no generan pérdidas.

Por último, se verificaron los resultados obtenidos con lo presentado en [14], donde las pérdidas son muy similares a las obtenidas en este trabajo. En contraste se observa una posible incoherencia en el perfil de tensiones dado por los autores en dicho trabajo (ver Tabla VIII, Anexo C).

VI. RECOMENDACIONES

Para el método exacto hubiera sido mejor intentar minimizar las pérdidas del sistema de prueba utilizando un método un poco más acorde a las variables del problema, cómo es la programación entera binaria - BIP, pero esto sólo se logró determinar una vez se obtuvieron los resultados del híbrido presentado en este trabajo.

VII. REFERENCIAS

- [1] A. Merlin y H. Back, «Search for a Minimal-Loss operating spanning tree configuration in a urban power distribution system,» de *Proc. 5th Power System Computation Conference (PSCC)*, Cambridge (UK), 1975.
- [2] D. Shirmohammadi y H. W. Hong, «Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. Vol. 4, n° No. 2, pp. pp. 1492 - 1498, 1989.
- [3] T. E. McDermott, I. Drezga y R. P. Broadwater, «A heuristic nonlinear constructive method for distribution system reconfiguration,» *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. Vol. 14, n° No. 2, pp. pp. 478 - 483, 1999.
- [4] M. E. Baran y F. F. Wu, «Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. Vol. 4, n° No. 2, pp. pp. 1401 - 1407, 1989.
- [5] J. M. López y L. A. Gallego, «Flujo de potencia óptimo usando el método del gradiente para reducción de pérdidas en sistemas de potencia,» *Ingeniería y Ciencia*, vol. Vol. 4, n° No. 7, pp. pp. 71 - 85, 2008.
- [6] D. O. Anaut, G. F. Di Mauro, G. Meschino y J. A. Suarez, «Optimization of Electrical Networks using Genetic Algorithms,» *Información Tecnológica*, vol. Vol. 20, n° No. 4, pp. pp. 137 - 148, 2009.
- [7] J. A. González, I. Lisan y J. Hifikepunje, «Algoritmo Heurístico para la Reconfiguración de Sistemas de Distribución Mediante Intercambio de Ramas,» *Energética*, vol. Vol. 33, n° No. 3, pp. pp. 196 - 204, 2012.
- [8] J. R. A. Rodriguez y A. Vargas, «Fuzzy-heuristic methodology to estimate the load restoration time in MV networks,» *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. Vol. 20, n° No. 2, pp. pp. 1095 - 1102, 2005.
- [9] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo y R. J. Thomas, «MATPOWER: Steady-State Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education,» *IEEE Transactions on Power Systems*, , vol. Vol. 26, n° No. 1, pp. pp. 12 - 19, 2011.
- [10] R. Gallego, A. Escobar y E. M. Toro, *Técnicas metaheurísticas de optimización*, Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2008.
- [11] Q. M. Martín, et. al., *Investigación operativa: problemas y ejercicios resueltos*, Madrid: Pearson Educación S. A., 2005.
- [12] M. S. Bazaraa, H. D. Sherali y C. M. Shetty, *Nonlinear programming: theory and algorithms*, 3rd edition ed., New Jersey: Wiley-Interscience, 2006.
- [13] B. Venkatesh, R. Ranjan y H. B. Gooi, «Optimal Reconfiguration of Radial Distribution Systems to Maximize Loadability,» *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. Vol. 19, n° No. 1, pp. pp. 260 - 266, 2004.
- [14] M. F. Sulaima, M. F. Mohamad, M. H. Jali, W. M. Bukhari y M. F. Baharom, «A Comparative Study of Optimization Methods for 33kV Distribution Network Feeder Reconfiguration,» *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. Vol. 9, n° No. 9, pp. pp. 1169 - 1182, 2014.

ANEXO A

SISTEMA DE PRUEBA IEEE 33 BUS

En la Tabla VII se presentan los datos dados para el sistema de prueba IEEE de 33 barras.

Line number	Sending Bus	Receiving Bus	Resistance (Ω)	Reactance (Ω)	Load at Receiving End Bus	
					Real Power (kW)	Reactive Power (kVAr)
1	1 Main SS	2	0.0922	0.0477	100.0	60.0
2	2	3	0.4930	0.2511	90.0	40.0
3	3	4	0.3660	0.1864	120.0	80.0
4	4	5	0.3811	0.1941	60.0	30.0
5	5	6	0.8190	0.7070	60.0	20.0
6	6	7	0.1872	0.6188	200.0	100.0
7	7	8	1.7114	1.2351	200.0	100.0
8	8	9	1.0300	0.7400	60.0	20.0
9	9	10	1.0400	0.7400	60.0	20.0
10	10	11	0.1966	0.0650	45.0	30.0
11	11	12	0.3744	0.1238	60.0	35.0
12	12	13	1.4680	1.1550	60.0	35.0
13	13	14	0.5416	0.7129	120.0	80.0
14	14	15	0.5910	0.5260	60.0	10.0
15	15	16	0.7463	0.5450	60.0	20.0
16	16	17	1.2890	1.7210	60.0	20.0
17	17	18	0.7320	0.5740	90.0	40.0
18	2	19	0.1640	0.1565	90.0	40.0
19	19	20	1.5042	1.3554	90.0	40.0
20	20	21	0.4095	0.4784	90.0	40.0
21	21	22	0.7089	0.9373	90.0	40.0
22	3	23	0.4512	0.3083	90.0	50.0
23	23	24	0.8980	0.7091	420.0	200.0
24	24	25	0.8960	0.7011	420.0	200.0
25	6	26	0.2030	0.1034	60.0	25.0
26	26	27	0.2842	0.1447	60.0	25.0
27	27	28	1.0590	0.9337	60.0	20.0
28	28	29	0.8042	0.7006	120.0	70.0
29	29	30	0.5075	0.2585	200.0	600.0
30	30	31	0.9744	0.9630	150.0	70.0
31	31	32	0.3105	0.3619	210.0	100.0
32	32	33	0.3410	0.5302	60.0	40.0
33*	21	8	0.0000	2.0000		
34*	9	15	0.0000	2.0000		
35*	12	22	0.0000	2.0000		
36*	18	33	0.0000	0.5000		
37*	25	29	0.0000	0.5000		

* Tie Lines, Substation Voltage =12.66 kV

Tabla VII. Tabla de datos del sistema de prueba. Tomado de [13].

ANEXO B

SISTEMA DE PRUEBA IEEE 33 BUS EN MATPOWER V3.2

```

function [baseMVA, bus, gen, branch, areas, gencost] = pcase33
%CASE33 Power flow data for IEEE 33 bus test system
%   Please see CASEFORMAT for details on the case file format.

%   Based on data from: B. Venkatesh, Rakesh Ranjan, and H. B. Gooi, "Optimal
%       Reconfiguration of Radial Distribution Systems to Maximize Loadability",
%       IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 1, 2004.

%   $Id: case5.m 2408 2014-10-22 20:41:33Z ray $

%% MATPOWER Case Format : Version 2
version = '2';

%%----- Power Flow Data -----%%
%% system MVA base
baseMVA = 1;

%% bus data
% bus_i  type  Pd  Qd  Gs  Bs  area  Vm  Va  baseKV  zone  Vmax  Vmin
bus = [
1  3  0.000  0.000  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
2  1  0.100  0.060  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
3  1  0.090  0.040  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
4  1  0.120  0.080  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
5  1  0.060  0.030  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
6  1  0.060  0.020  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
7  1  0.200  0.100  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
8  1  0.200  0.100  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
9  1  0.060  0.020  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
10 1  0.060  0.020  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
11 1  0.045  0.030  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
12 1  0.060  0.035  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
13 1  0.060  0.035  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
14 1  0.120  0.080  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
15 1  0.060  0.010  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
16 1  0.060  0.020  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
17 1  0.060  0.020  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
18 1  0.090  0.040  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
19 1  0.090  0.040  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
20 1  0.090  0.040  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
21 1  0.090  0.040  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
22 1  0.090  0.040  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
23 1  0.090  0.050  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
24 1  0.420  0.200  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
25 1  0.420  0.200  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
26 1  0.060  0.025  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
27 1  0.060  0.025  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
28 1  0.060  0.020  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
29 1  0.120  0.070  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
30 1  0.200  0.600  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
31 1  0.150  0.070  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
32 1  0.210  0.100  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
33 1  0.060  0.040  0  0  1  1  0  12.66  1  1.1  0.9;
];

```

```

%% generator data
% bus Pg Qg Qmax Qmin Vg mBase status Pmax Pmin Pc1 Pc2
Qc1min Qc1max Qc2min Qc2max ramp_agc ramp_10 ramp_30 ramp_q apf
gen = [
1 0 0 30 -30 1 1 1 40 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0;
];

%% branch data
% fbus tbus r x b rateA rateB rateC ratio angle status
angmin angmax
branch = [
1 2 0.000575259 0.000297612 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
2 3 0.003075952 0.001566676 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
3 4 0.002283567 0.001162997 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
4 5 0.002377779 0.001211039 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
5 6 0.005109948 0.004411152 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
6 7 0.001167988 0.00386085 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
7 8 0.010677857 0.007706101 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
8 9 0.00642643 0.004617047 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
9 10 0.006488823 0.004617047 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
10 11 0.001226637 0.000405551 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
11 12 0.002335976 0.00077242 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
12 13 0.009159223 0.007206337 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
13 14 0.003379179 0.004447963 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
14 15 0.003687398 0.003281847 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
15 16 0.004656354 0.003400393 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
16 17 0.008042397 0.010737754 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
17 18 0.004567133 0.003581331 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
2 19 0.001023237 0.000976443 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
19 20 0.009385084 0.008456683 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
20 21 0.002554974 0.002984859 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
21 22 0.004423006 0.005848052 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
3 23 0.002815151 0.001923562 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
23 24 0.005602849 0.004424254 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
24 25 0.005590371 0.00437434 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
6 26 0.001266568 0.000645139 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
26 27 0.001773196 0.00090282 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
27 28 0.006607369 0.00582559 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
28 29 0.005017607 0.004371221 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
29 30 0.003166421 0.001612847 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
30 31 0.006079528 0.006008401 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
31 32 0.001937288 0.002257986 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
32 33 0.002127585 0.003308052 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
21 8 0 0.012478506 0 0 0 0 0 0 -360 360;
9 15 0 0.012478506 0 0 0 0 0 0 -360 360;
12 22 0 0.012478506 0 0 0 0 0 0 -360 360;
18 33 0 0.003119626 0 0 0 0 0 0 -360 360;
25 29 0 0.003119626 0 0 0 0 0 0 -360 360;
];

%%----- OPF Data -----%%
%% generator cost data
% 1 startup shutdown n x1 y1 ... xn yn
% 2 startup shutdown n c(n-1) ... c0
gencost = [
1 0 0 2 14 0; % realmente no se utilizan,
]; % pero deben estar para que Matpower funcione

```

ANEXO C

CONTRASTE DE RESULTADOS

En la Tabla VIII se muestran los resultados del estudio en [14], donde se presenta las “mejoras” obtenidas en el perfil de tensión en por unidad para el sistema de prueba IEEE de 33 barras utilizando reconfiguración.

<i>Bus No.</i>	<i>Voltage Magnitude in p.u</i>		
	<i>ABC</i>	<i>PSO</i>	<i>GA</i>
1	1.000	1.000	1.000
2	1.000	1.000	1.000
3	1.000	1.000	1.000
4	1.000	1.000	1.000
5	1.000	1.000	1.000
6	1.000	1.000	1.000
7	1.000	0.999	0.995
8	1.000	0.999	0.995
9	1.000	0.999	0.995
10	1.000	0.999	0.995
11	1.000	0.999	0.995
12	1.000	0.999	0.995
13	1.000	0.999	0.999
14	1.000	0.999	0.999
15	1.000	0.999	0.999
16	1.000	0.999	0.999
17	1.000	0.999	0.999
18	1.000	0.999	0.999
19	1.000	1.000	1.000
20	1.000	1.000	1.000
21	1.000	0.999	0.982
22	1.000	0.999	0.982
23	0.999	1.000	0.982
24	0.999	1.000	0.982
25	0.999	0.999	1.000
26	1.000	1.000	1.000
27	0.999	1.000	0.999
28	0.999	0.999	0.999
29	0.999	0.999	0.999
30	0.999	1.000	1.000
31	0.999	0.999	0.999
32	0.999	0.999	0.999
33	1.000	0.999	0.999

Tabla VIII. Perfiles de tensión obtenidos para los diferentes métodos metaheurísticos contrastados en [14]. Tomado de [14].