

## Reconfiguración de redes para reducir pérdidas en circuitos de distribución. Un caso de estudio

Network reconfiguration to reduce losses in distribution circuits. A case study

**M. Sc. Ing. Maykop Pérez Martínez\***

<maykop@electrica.cujae.edu.cu>

<https://orcid.org/0000-0003-3073-1675>

**Dr. C Ariel Santos Fuentesfria\*\***

<asfuentesfria@electrica.cujae.edu.cu>

<https://orcid.org/0000-0002-9131-5539>

**Ing. José Orlando Barroso Campa\*\*\***

<jbarrosocampa@gmail.com>

<https://orcid.org/0000-0002-1499-8532>

\*, \*\* Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba y \*\*\* Empresa eléctrica provincial Mayabeque UEB Centro Territorial de Operaciones, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

### RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo proponer mejoras técnicas y organizativas para disminuir las pérdidas en la distribución de energía eléctrica tomándose como caso de estudio el circuito C-14 de distribución a 13,2 kV del municipio capital San José de las Lajas en la provincia Mayabeque, Cuba. Con las mejoras realizadas al circuito, los valores de pérdidas de potencia en porcentaje decrecieron desde un valor de 3,76 % a 2,31 %. Los niveles de caídas de tensión en porcentaje disminuyeron desde un valor de 8,17 % a 5,29 %. Según el análisis económico, se recuperó la inversión en un período de dos años y obteniéndose un ahorro de energía eléctrica de 131 082,45 kWh/año.

**Palabras clave:** pérdidas en la distribución de energía eléctrica, reconfiguración de circuitos de distribución.

### ABSTRACT

The present work aims to propose technical and organizational improvements to reduce losses in the distribution of electricity, taking as a case study the C-14 distribution circuit at 13,2 kV of the capital municipality of San José de las Lajas in the Mayabeque province, Cuba. With the improvements made to the circuit, the power loss values in percentage decreased from a value of 3,76 % to 2,31 %. The voltage drops levels in percentage decreased from a value of 8,17% to 5,29%. On the economic analysis, recovering the investment in a period of two years and obtaining electrical energy savings of 131 082,45 kWh / year.

**Keywords:** losses in the distribution of electricity, reconfiguration of distribution circuits.



## INTRODUCCIÓN

De acuerdo con las referencias (1) y (2) la energía eléctrica es uno de los factores del crecimiento ininterrumpido de la actividad económica y mejora de las condiciones de vida de la población. Las infraestructuras y los servicios conectados son considerados como uno de los pilares del desarrollo y de la competitividad de las economías.

El mejoramiento del sistema de energía proporciona gran calidad de vida y de trabajo a los residentes de una determinada área. Los trabajos en tensión constituyen, desde la época en que empezaron a ensayar sus primeros pasos, una herramienta indispensable que permite, a quién tiene a su cargo la exploración de las redes de transporte y de distribución pública de energía eléctrica, mantener la calidad del servicio que los clientes de esas redes necesitan, evitando las interrupciones del suministro eléctrico ya sea por averías o por la realización de trabajos de mantenimiento y construcción.

Por otro lado, en correspondencia con lo planteado por los autores de la obra (3) el objetivo de las redes de distribución es mantener en los terminales de los consumidores de energía eléctrica un nivel de tensión adecuado con una cierta confiabilidad. El crecimiento de la demanda de energía eléctrica y el envejecimiento de los componentes de la red provocan un incremento de las pérdidas de potencia activa con el consecuente incremento de los costos de explotación y de las interrupciones del servicio eléctrico. Cuando esto sucede, se justifica, tanto desde el punto de vista técnico como económico, mejorar la red de distribución.

La reconfiguración de las redes de distribución es una mejora que emplea las características de la topología de dichas redes, para modificarla, y así reducir las pérdidas eléctricas y reducir el número de clientes afectados por una falla. Las redes de distribución se operan radiales y se construyen malladas, por lo tanto, es posible intercambiar carga entre un alimentador y otro, hasta obtener un punto de operación adecuado.

Por su parte en la investigación (4) se afirma que la reconfiguración de las redes eléctricas de distribución es el mejor de los métodos en la reducción de las pérdidas, según los análisis realizados se ha demostrado que es más económico recuperar un kW de pérdidas realizando mejoras, que no generarlo a partir de otras fuentes.

Como ya se mencionó las pérdidas de energía son el indicador de la eficiencia del sistema electroenergético. En conjunto como plantea la investigación (5), en Cuba, típicamente las pérdidas en los sistemas subtransmisión y distribución representan el 10,95 %, en ese sentido, la Unión Nacional Eléctrica (UNE) ha comenzado desde el año 2000 un programa de reducción de pérdidas con mejoras en las redes de distribución, con el objetivo de reducirlas por debajo al 10%, y por otro

lado a partir del año 2005, de acuerdo con (6), comienza el programa de la Revolución Energética en Cuba, cuyo objetivo fundamental era transformar radicalmente el proceso de generación y ahorro de electricidad a través de medidas como la rehabilitación de las redes eléctricas de distribución, que presentan un alto grado de deterioro producto de la imposibilidad, en períodos anteriores de ejecutar su mantenimiento sistemático y de modernización.

Todo este proceso se evidencia en la actualización de los lineamientos de la política económica y social del partido y la revolución para el período 2016-2021 en donde se plantea mantener una política activa en el acomodo de la carga eléctrica, que disminuya la demanda máxima y reduzca su impacto sobre las capacidades de generación. Proseguir el programa de rehabilitación y modernización de redes y subestaciones eléctricas, de eliminación de zonas de baja tensión, logrando los ahorros planificados por disminución de las pérdidas en la distribución y transmisión de energía eléctrica. Avanzar en el programa aprobado de electrificación en zonas aisladas del Sistema Electroenergético Nacional, en correspondencia con las necesidades y posibilidades del país, utilizando las fuentes más económicas.

Además, en reciprocidad con el análisis anterior, existen diferentes autores, tanto nacionales como internacionales, que aportan elementos de manera significativos en cuanto a la propuesta de los diferentes métodos de reconfiguración de redes eléctricas de distribución, para dar soluciones a estas problemáticas, entre estos se destacan las investigaciones (7), (8), (9), (10), (11), (12), (13) y (14).

Todos estos autores han reconocido la importancia de investigar y realizar estudios que enriquezcan las diferentes metodologías a tener en cuenta a la hora de realizar la reconfiguración de las redes eléctricas de distribución; sin embargo, se valora la necesidad de realizar investigaciones referentes a esta problemática en la resolución de problemas propios de las redes de distribución del sistema electroenergético nacional cubano a partir de los lineamientos de la política económica y social antes mencionados.

Como caso de estudio se tiene el circuito C-14, ubicada en la provincia de Mayabeque en el municipio San José de las Lajas, la subestación, a la que este circuito pertenece, no se encuentra en el centro de carga por lo que presenta altos valores de pérdidas de potencia y caída de tensión en la distribución de energía, por lo que se hace necesario realizar un estudio técnico – económico que permita disminuir dichas pérdidas. Partiendo entonces del siguiente problema científico de investigación: ¿Cómo reconfigurar el circuito C-14 de manera que permita disminuir las pérdidas en la distribución de energía?

Para dar respuesta al problema formulado se parte de realizar el estudio de la reconfiguración del circuito C -14, posibilitando la propuesta de mejoras técnicas y organizativas que permitirán su mejor

operación técnica y económica.

El objetivo general de la investigación es proponer mejoras técnicas y organizativas para disminuir las pérdidas en la distribución de energía eléctrica en el Circuito C-14.

Como objetivos específicos que sirven de guía en el transcurso del proceso investigativo, se formulan las siguientes:

1. Analizar los métodos de reconfiguración que permiten disminuir las pérdidas en las redes radiales.
2. Caracterizar la red de distribución del Circuito C-14.
3. Proponer las mejoras técnicas y organizativas que sean factibles desde el punto de vista técnico y económico.

## **DESARROLLO**

Por la importancia y necesidad de conocer el estado técnico del circuito de distribución C-14 y antes la problemática que actualmente , no es eficiente en operación, con pérdidas de potencia activa superiores al 3% recomendado por la OLADE y caídas de tensión por encima del 7% normado por la UNE, se realizó esta investigación, en la cual se consultaron un total de 25 fuentes bibliográficas especializadas, se consultaron a los especialistas de las Empresa Eléctrica de Mayabeque y se revisaron los planos y documentos técnicos referentes al circuito en estudio, para de esta forma obtener el estado técnico actual y proponer una metodología, a través de un plan de mejoras, que posibilite reconfigurar el circuito C -14 de manera que disminuyan las pérdidas en la distribución de energía a partir del estudio de las mejoras técnicas y organizativas.

Dentro de las fuentes consultadas se encuentran las investigaciones (15), (16), (17), (18) y (19), con las cuales se pudieron constatar que Los métodos para la reducción de pérdidas técnicas más utilizados son: ubicación de condensadores, cambio de calibre del conductor, elevación de los niveles de tensión de servicio, balanceo de carga, reconfiguración del circuito, los cuales fueron utilizados para determinar el plan de medidas a implementar para la mejora técnica del circuito de distribución en estudio, obteniéndose como resultado que la reconfiguración de los alimentadores de distribución es la que mayor relación beneficio/costo reporta y ha producido excelentes resultados en las empresas de energía que la han implementado.

En ese sentido, de acuerdo con el estudio de las investigaciones desarrolladas por (20), (21) y (22) la metodología propuesta para la reconfiguración del circuito de distribución se realiza normalmente partiendo del sistema existente, de modo tal que se puedan ajustar esencialmente los niveles de cargabilidad de los circuitos. Un análisis de reconfiguración de alimentadores puede conllevar a la modificación misma de los recorridos de los circuitos y de sus puntos de alimentación, lo cual no es

muy deseable en la mayoría de los casos por los altos costos que esto implica. El problema se puede enfocar desde los puntos de vistas:

1) En línea:

La reconfiguración del sistema eléctrico de distribución, es realizada mediante la abertura o cierre de los seccionadores automáticos o motorizados, manteniéndose la topología radial de la red y minimizando las pérdidas de potencia activa en los alimentadores y distribuidores del sistema eléctrico de distribución. La modificación de la topología de la red se realiza en vivo, es decir, con el sistema energizado, es una técnica en línea.

2) Fuera de línea:

La reconfiguración del sistema eléctrico de distribución, es realizada mediante la modificación de la topología, es decir, las conexiones se realizan mediante la construcción de ramales que interconectan los distintos alimentadores y distribuidores. También, es posible, mediante el uso de seccionadores, pero la modificación de la topología se realiza fuera de línea, es decir, con la red desenergizada.

En el estudio que se propone se parte primero de la caracterización del estado técnico actual del circuito de distribución, para luego con la ayuda del software Radial, atendiendo a que el mismo es el implementado por la Unión Eléctrica para el planeamiento de redes de distribución primaria, realizar la propuesta de reconfiguración de los alimentadores de distribución del circuito C-14.

### **Estado actual de la Subestación**

La Subestación de distribución primaria tiene instalado dos transformadores, uno de 1 000 kVA, el cual alimenta al circuito C-13, y uno de 2 500 kVA el cual alimenta al circuito BK.143; conectados ambos en delta-estrella aterrada. Los mismos se alimentan por el primario del circuito de subtransmisión a la tensión de 34,5 kV y brindan su servicio por el secundario a la tensión de 13,2 kV. La subestación cuenta con un interruptor "Nulec" ubicado a la salida del alimentador del circuito C-14.

### **Estado actual del circuito C-14**

El circuito de distribución primaria C-14, tiene aproximadamente 64 766 km de líneas de construcción aérea; con su distribución en forma radial, el principal conductor utilizado en el circuito es el AAAC78 mm<sup>2</sup>

El circuito presenta una capacidad instalada total de 9 115 kVA de transformadores distribuidos por fase de la forma siguiente:

Fase A: 2 950 Kva      Fase B: 3 120 Kva      Fase C: 3 045 kVA.

Del análisis de la lectura del interruptor *Nulec* colocado a la salida del alimentador de la subestación, el cual realiza lecturas durante todo el año en un intervalo de 15 min, se pudo determinar la curva de carga diaria de máxima demanda registrada con un factor de potencia promedio de 0,87 y una

demanda máxima de 2 845 kVA, mostrada en la figura 1 obtenida en el software RADIAL.

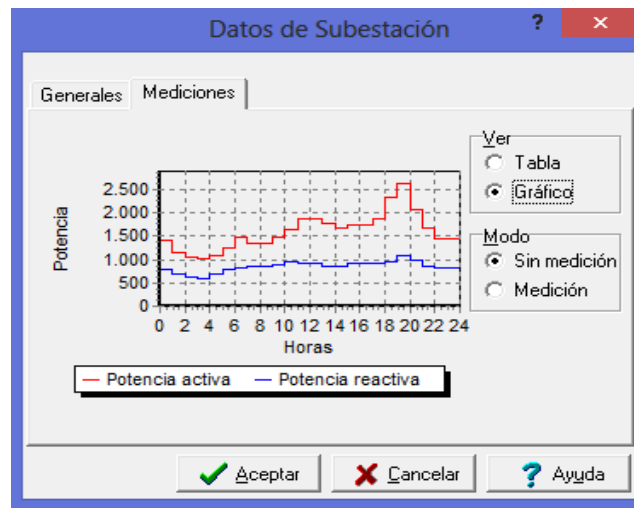


Figura 1. Curva cronológica de carga diaria obtenida con el software RADIAL

A partir de conocerse la demanda máxima (DM) y la capacidad instalada de transformadores (CIT) se pudo determinar el factor de capacidad ( $F_{Cap}$ ) del circuito, mediante la ecuación 1, obteniéndose como resultado que solo se aprovecha el 31 % de la capacidad instalada de transformadores.

$$F_{Cap} = \frac{DM}{CIT} = \frac{2\,845}{9\,115} = 0,31 \quad (1)$$

También pudo ser determinado el porcentaje de desbalance del circuito a partir del método de las corrientes por fases, como se muestra en la ecuación 2.

$$\%Desb = \frac{I_{m\acute{a}x} - I_{m\acute{i}n}}{I_{m\acute{a}x}} \cdot 100 = \frac{151 - 104}{151} \cdot 100 = 31,12\% \quad (2)$$

Donde:

$\%Desb$  : Porcentaje de desbalance del circuito.

$I_{m\acute{a}x}$  : Corriente máxima de las fases en la hora de DM en amperes.

$I_{m\acute{i}n}$  : Corriente mínima de las fases en la hora de DM en amperes.

El resultado obtenido por el método de las corrientes por fase refleja que el porcentaje de desbalance, es superior al 15 %, por lo que se considera el circuito desbalanceado.

Con el objetivo de realizar una corrida de flujo de cargas monofásico con el software Radial para poder determinar la caída de tensión y las pérdidas del circuito, para a partir de estos resultados proponer plan de mejoras al circuito C-14, se procedió a realizar el balanceo teórico del circuito, siguiendo la siguiente metodología. Se comenzó por los nodos más lejanos y cambiando los bancos monofásicos de la fase más cargada, fase B, a la menos cargada, fase A, trasladándose 100 kVA de

la fase B hacia la A, obteniéndose como resultado que el desbalance después de la mejora es de un 0,98 %.

Una vez realizado el balanceo del circuito, se realiza la corrida del flujo de cargas monofásico en el software Radial obteniéndose como resultado los valores de pérdidas y caídas de tensión mostradas en la tabla 1 y la figura 2 respectivamente.

Tabla 1. Resultados de la corrida del flujo de carga monofásico del circuito C-14, después de realizado el balanceo de cargas

<b>Concepto</b>	<b>Valor</b>	<b>U/ M</b>
Potencia activa de las cargas	2 630,90	k W
Potencia reactiva de las cargas	1 076,42	kv ar
Pérdidas totales de potencia activa	102,8 5	k W
Porcentaje de pérdidas de potencia	3,76	%
Factor de carga del circuito	0,64	
Pérdidas totales de energía	1 498,42	k W.h
Porcentaje de pérdidas de energía	3,75	%

Los valores del porcentaje de pérdidas de potencia activa total son del 3,76 %, el cual es superior en un 0,25 % al valor límite recomendado por la OLADE para un circuito en operación que es un 3 %.

En la figura 2 se observan los valores de caída de tensión en porcentaje en cada nodo. Apreciándose que en el circuito C-14 el nodo 252 es el más crítico, siendo el más alejado de la subestación presentando un 8,17 % de caída de tensión, no cumpliendo con lo normado por la UNE para un circuito en operación ya que su valor de caída de tensión es superior al 7 %.

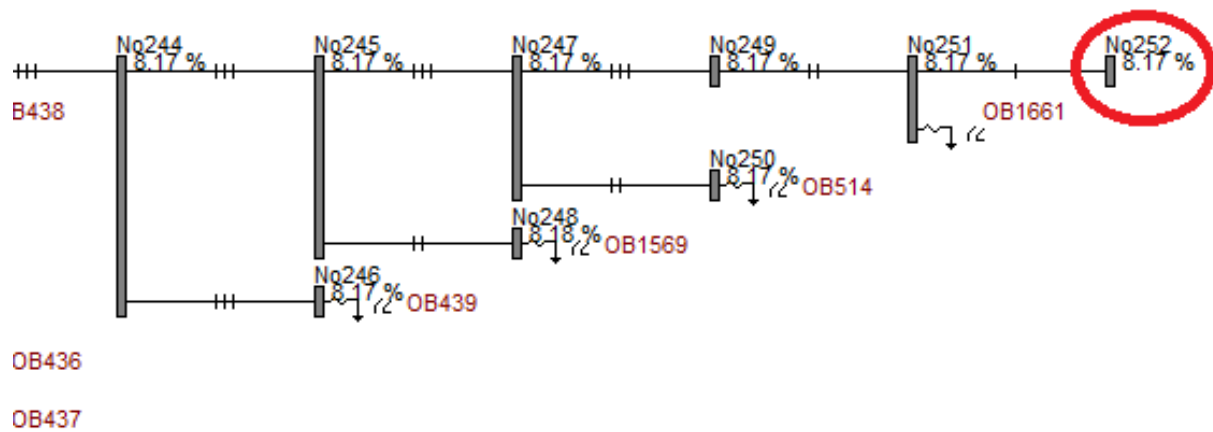


Figura 2. Valores de caída de tensión en porcentaje en cada nodo del circuito C-14, después de realizado el balanceo de cargas. Fuente: software Radial

A partir de estos resultados se propone el siguiente analizar las siguientes mejoras técnicas:

### Cambio de calibre de los conductores

Del análisis de los resultados de los porcentajes de pérdidas de potencia activa, igual al 3,76 % y los porcentajes de caída de tensión del 8,17 % en el nodo más lejano, se determinó cambiar el conductor en los lugares donde se encuentran en mal estado, también cambiar los ramales, donde aún quedan los conductores de  $Cu_6$ ,  $Cu_4$ .

En la tabla 2 se muestran los resultados al realizar la corrida del flujo de cargas monofásico, después de implementar la mejora del cambio de calibre de los conductores.

Tabla 2. resultados del flujo de cargas monofásico después del cambio de calibre de los conductores del circuito C-14

Concepto	Valor	U/ M
Potencia activa de las cargas	2 630,90	k W
Potencia reactiva de las cargas	1 076,42	kv ar
Pérdidas totales de potencia activa	102,4 1	k W
Porcentaje de pérdidas de potencia	3,75	%
Factor de carga del circuito	0,64	
Pérdidas totales de energía	1 494,17	k W.h
Porcentaje de pérdidas de energía	3,74	%



Los valores del porcentaje de pérdidas luego de la mejora son del 3,75 %, a pesar de disminuir las pérdidas en un 0,01 %, el porcentaje de pérdidas sigue siendo superior al valor límite del 3 % recomendado por la OLADE para un circuito en operación. Por lo que no es recomendable realizar el cambio de calibre desde el punto de vista económico.

### Estudio de condensadores

El circuito C-14 no cuenta con bancos de condensadores instalados. Esta mejora requiere de un análisis tanto técnico como económico, eligiendo las más rentable desde el punto de vista técnico y económico. Los métodos utilizados para la instalación de un banco de condensadores fueron: selección de los bancos de condensadores para máxima reducción de pérdidas de energía y selección de los bancos de condensadores para máxima reducción de pérdidas de potencia, en correspondencia con (23) y (24). Para el análisis de la selección de la variante desde el punto de vista económico se utilizaron los métodos de la relación beneficio/costo y el valor actual neto (VAN).

La figura 3 muestra la curva de carga diaria de potencia reactiva del día de máxima demanda del análisis de las mediciones realizadas, tomada para la selección de un banco de condensadores fijos, y la figura 4 muestra cómo se comporta el factor de potencia para ese mismo, observándose que la mayor parte del tiempo está por debajo de 0,9 por lo que se justifica el análisis de esta mejora.

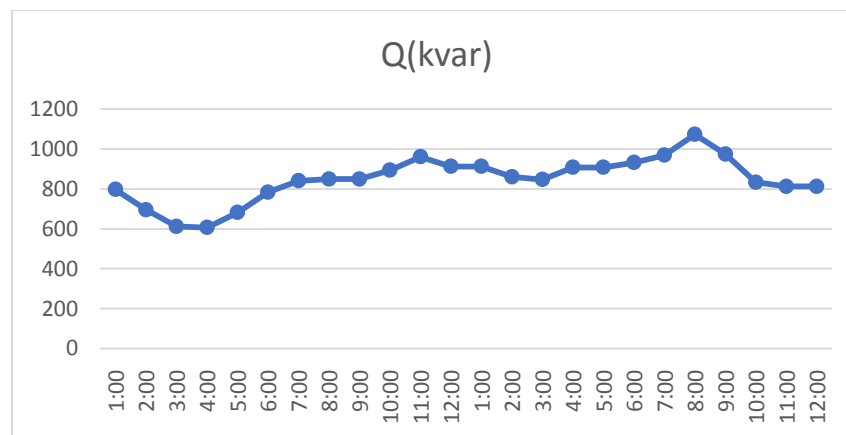


Figura 3. curva de carga diaria de potencia reactiva del día de máxima del circuito C-14

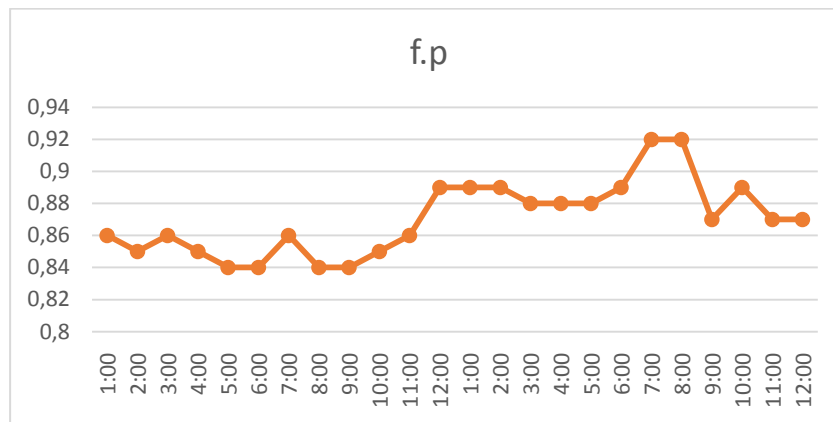


Figura 4. Comportamiento del factor de potencia del día de máxima del circuito C-14

Las tablas 3 y 4 muestran los resultados de ambos métodos y el análisis de las variantes propuestas.

**Tabla 3.** Resultados por variante de la selección de condensadores para máxima reducción de pérdidas de energía, obtenidos en el software RADIAL

Cantidad bancos	kvar/Banco	Nodo(s)	Inversiones (MP)	Ahorro: MW/h/año	Disminución de DP (kW)	Beneficio/costo	VAN
Bancos de 150							
1	150	No204	2,7	17,2	3	13,2	32,6
2	150	No204, No137	5,4	26,9	5	10,3	49,8
3	150	No204, No137, No86	8,0	31,9	6	8,2	57,5
4	150	No204, No137, No86, No68	10,7	33,9	7	6,5	58,9
Bancos de 300							
1	300	No143	5,0	26,2	5	10,8	48,9
2	300	No143, No68	10,0	33,2	7	6,8	58,2
Bancos de 450							
1	450	No137	7,5	29,1	6	7,9	52,2

**Tabla 4.** Resultados por variante de la selección de condensadores para máxima reducción de pérdidas de potencia, obtenidos por el software RADIAL

Cantidad bancos	kvar/Banco	Nodo(s)	Inversiones (MP)	Ahorro: MW/h/año	Disminución de DP (kW)	Beneficio/costo	VAN
Bancos de 150							
1	150	No232	2,7	17,1	3	13,1	32,4
2	150	No232, No143	5,4	26,9	5	10,2	49,2
3	150	No232, No143, No130	8,0	30,8	6	7,9	55,2
4	150	No232, No143, No130, No86	10,7	32,6	7	6,3	56,3
Bancos de 300							
1	300	No202	5,0	25,5	5	10,5	47,3
2	300	No202, No86	10,0	32,4	7	6,7	56,5
Bancos de 450							
1	450	No143	7,5	28,5	6	7,8	51,0

Del análisis de las tablas 3 y 4 que muestran las variantes de selección de condensadores para máxima reducción de pérdidas de energía y selección de condensadores para máxima reducción de pérdidas de potencia, se concluye que desde el punto de vista técnico y económico las variantes a escoger son, la de un banco de condensadores de 150 kvar en el nodo 204 y la de un banco de condensadores de 300 kvar en el nodo 143, ambas con una relación beneficio costo del 103 % y 37 % tomando como referencia la de menor relación beneficio costo de ambas variantes, además si se compara las inversiones a realizar ambas representan el 50 % aproximadamente, menor con igual referencia.

Con el objetivo de validar esta mejora se realiza la corrida de un flujo de cargas con el software Radial, cuyos resultados se muestran la tabla 5, arrojando que los valores del porcentaje de pérdidas luego de la mejora son alrededor del 3,53 %, reduciendo en un 0,23 % al 3,76 % obtenido en la primera corrida de flujo. Esta mejora no se justifica técnicamente porque el porcentaje de pérdidas del circuito sigue siendo superior al valor límite del 3 % recomendado por la OLADE para un circuito en operación.

Tabla 5. Resultados del flujo de cargas monofásico, después de implementar la instalación de condensadores, obtenidos por el software Radial

Concepto	Valor	U
----------	-------	---

		/M
Potencia activa de las cargas	2 630,90	k W
Potencia reactiva de las cargas	1 076,42	k var
Porcentaje de pérdidas de potencia	3,53	%
Potencia reactiva en condensadores	450,0 0	k var
Porcentaje de pérdidas de energía	3,55	%

En la figura 5 se observan los valores de caída de tensión en porcentaje en cada nodo del circuito C-14, después de implementar la instalación de condensadores propuesta.

Se puede apreciar que el nodo más crítico en el circuito C-14 es el No252 el cual presenta un 7,31 % de caída de tensión. A pesar de reducir este porcentaje en un 0,86 % respecto al 8,17 % del estado técnico actual del circuito, se encuentra en los valores no permisibles para la operación superando el 7 % recomendado por la UNE para un circuito en operación.

Visto los resultados anteriores, luego de implementar la mejora técnica de instalación de condensadores se obtiene que no es factible dicha mejora, pues no cumple con los niveles de pérdidas recomendados por la OLADE ni con los niveles de caída de tensión recomendados por la UNE.

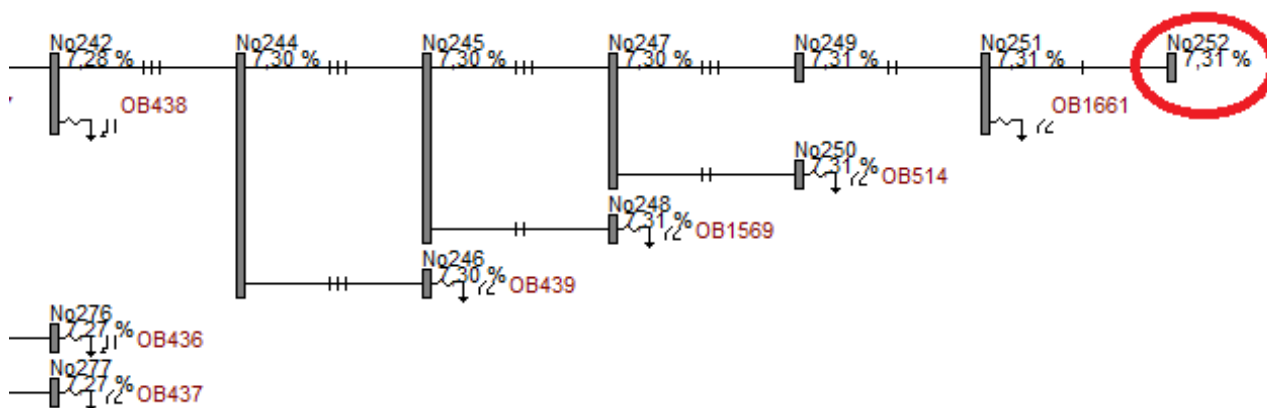


Figura 5. Valores de caída de tensión en porcentaje en cada nodo del circuito C-14, después de implementar la instalación de condensadores propuesta. Fuente: Software Radial

### Reconfiguración de los alimentadores de distribución del circuito C-14

Después de analizar las mejoras expuestas anteriormente se procede a la reconfiguración de los

alimentadores de distribución del circuito C-14.

Teniendo en cuenta que la subestación se encuentra al inicio del circuito y no en su centro de carga, se propone complementar una línea de 587 m desde la salida de la subestación hasta el nodo No.24 (OB-1 442), instalando un interruptor normalmente abierto en el nodo No.20 (OB-1 323). Además, complementar una línea de 1 345 m desde la salida de la subestación hasta el nodo No.103 (OB-453), en el nodo No.132 donde se encuentra un interruptor normalmente cerrado, este cambiará a normalmente abierto. Con esto se aumentará la flexibilidad del circuito y se distribuirá la carga.

En la tabla 6 se muestran los resultados, utilizando el software Radial, al realizar la corrida del flujo de cargas monofásico del circuito C-14, después de implementar la reconfiguración propuesta.

Tabla 6. Resultados del flujo de cargas monofásico del circuito C-14, después de implementar la reconfiguración de los alimentadores

Concepto	Valor	U/ M
Potencia activa de las cargas	2 630,90	k W
Potencia reactiva de las cargas	1 076,42	kv ar
Porcentaje de pérdidas de potencia	2,37	%
Factor de carga del circuito	0,64	
Pérdidas totales de energía	1 139,29	k W.h
Porcentaje de pérdidas de energía	2,88	%

Del análisis de los resultados mostrados en la tabla 6, se obtiene que las pérdidas de potencia activa son del 2,37 %, siendo inferiores en 1,39 % comparadas con el estado técnico actual del circuito, además son inferiores al valor límite del 3 % recomendado por la OLADE para un circuito en operación. Por lo que es recomendable técnicamente aplicar la mejora descrita.

En la figura 6 se muestran los valores de las caídas de tensión en porcentaje en cada nodo del circuito después de realizada la reconfiguración, en la que se puede apreciar que en el circuito C-14 es el nodo 242 es el más crítico ya que presenta un valor de caída de tensión de 5,63 %, inferior en 2,54 % respecto al 8,17 % con el estado técnico actual del circuito. El valor obtenido de 5,63 % luego de implementar la mejora de reconfiguración de los alimentadores del circuito C-14 se encuentra por debajo del 7 % valor límite de caída de tensión recomendado por la UNE para un circuito en

operación. Por lo que es factible técnicamente la mejora.

Visto los resultados anteriores, luego de implementar la mejora técnica de reconfiguración de alimentadores se obtiene que es factible dicha mejora, pues cumple con los niveles de pérdidas recomendados por la OLADE y con los niveles de caída de tensión recomendados por la UNE.

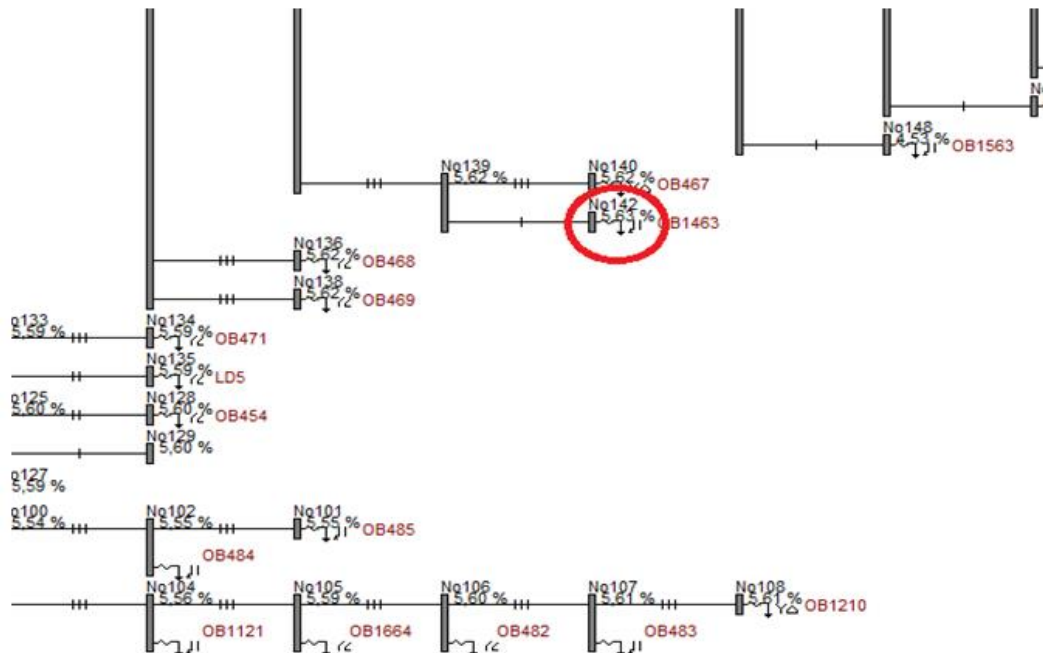


Figura 6. Valores de caída de tensión en porcentaje en cada nodo, después de implementada la reconfiguración del circuito C-14. Fuente: software Radial

## CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta que el propósito principal de esta investigación estuvo relacionado con los métodos de reconfiguración y el empleo del software Radial, se considera que las conclusiones son las siguientes:

- A partir de la caracterización del estado actual del circuito bajo estudio se determinó que el nivel de las pérdidas de potencia activa actuales es del 3,76 %, superior al 3 % recomendado por la OLADE para un circuito en operación, además el nivel de caída de tensión el más crítico, nodo 252, son del 8,17 % de caída de tensión, superior al 7 % recomendado por la UNE para un circuito en operación. De este análisis se implementaron mejoras técnicas organizativas siendo la mejora factible la de la reconfiguración de los alimentadores del circuito.
- A partir de la propuesta de la reconfiguración se redujeron las pérdidas desde un valor inicial de 3,76 % hasta 2,31 % quedando así el nivel de pérdidas por debajo del 3 % recomendado por la OLADE para un circuito en operación. De igual manera los niveles de caída de tensión

decrecieron desde un 8,17 % en el nodo 252 siendo este el más crítico antes de las mejoras hasta un valor de 5,29 % en el nodo 142 luego de implementar la reconfiguración de los alimentadores, encontrándose ahora los niveles de caídas de tensión por debajo del 7 % recomendado por la UNE para un circuito en operación. Se realizó la valoración técnica-económica referente a la propuesta realizada, arrojando resultados económicos comprendidos en un ahorro de 131 082,45 kWh/año equivalente a un valor de 22 284 USD en un año de explotación.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la dirección técnica de la Empresa Eléctrica de Mayabeque por la atención brindada para la realización de este trabajo investigativo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Pérez Martínez M. Higiene y seguridad en la red de baja tensión. pedagogía profesional. 2018; 16(1) <https://www.researchgate.net/publication/331438399>
2. Pérez Martínez M, Rodríguez Domínguez Y y Canasí Piñeiro M. Medidas de seguridad en el mantenimiento de la red de distribución eléctrica. Pedagogía Profesional. 2020; 18(2). <https://www.researchgate.net/publication/344229183>.
3. Salazar Fonseca I, De la Fé Dotres SP y Torres Guerrero G. Reconfiguración multiobjetivo en sistemas de distribución primaria de energía. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería. 2017; 25(2). <https://scielo.conicyt.cl/pdf/ingeniare/v25n2/0718-3305-ingeniare-25-02-00196.pdf>.
4. Martínez Miranda JN. Reconfiguración de redes eléctricas de distribución mediante el método heurístico de Optimización de Lazo Simple (Trabajo de Diploma). Villa Clara: Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, 2013. [https://minio2.123dok.com/dt02pdf/123dok\\_es/pdf/2020/06\\_08/jgofsu1591610157.pdf](https://minio2.123dok.com/dt02pdf/123dok_es/pdf/2020/06_08/jgofsu1591610157.pdf).
5. Cruz Bacardi J, Escalante Oliva A y Pérez Martínez M. El diseño del suministro eléctrico, un estudio de caso. Pedagogía Profesional. 2021; 19 (1) <https://www.researchgate.net/publication/349604311>.
6. Miranda Conde RM y García Meneses YC. La Revolución energética en Cuba. 10mo Congreso Internacional de Educación Superior. Universidad 2016; 2016. [https://www.ecured.cu/Revoluci%C3%B3n\\_Energ%C3%A9tica\\_en\\_Cuba](https://www.ecured.cu/Revoluci%C3%B3n_Energ%C3%A9tica_en_Cuba).
7. Cárcamo Gallardo A, García Santander L y Pezoa JE. Reconfiguración de redes eléctricas de media tensión basada en el algoritmo de PRIM. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería. 2007; 15(1)07. <https://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v15n1/Art11.pdf>.
8. Adan Guerrero JR. Minimización de pérdidas en redes de distribución mediante reconfiguración. Tesis de maestría. Instituto Politécnico Nacional. México. 2009. <https://sepielectrica.esimez.ipn.mx/Tesis/2009/Minimizacion%20De%20Perdidas%20En%20Redes%20De%20Distribucion%20Mediante%20Reconfiguracion.pdf>.
9. Valdés Díaz A. Reconfiguración de redes de distribución primaria en el municipio de Placetas (

Trabajo de diploma). Facultad de Ingeniería Eléctrica. Villa Clara: Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas; 2011

<https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/1488/Antonio%20Vald%C3%A9s%20Diaz.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

10. González Quintero JA, Sospedra Toledo Ey Alvarez Díaz M. Reconfiguración de sistemas de distribución mediante algoritmos genéticos basados en la teoría de Grafos. Ingeniería Energética. 2016; XXXVII(2) <http://scielo.sld.cu/pdf/rie/v37n2/rie05216.pdf>.
11. Apaza Tapia M. Estudio de control y disminución de pérdidas dentro del servicio eléctrico puno alimentador 101 - concesión eléctrica de Electropuno S.A.A (Trabajo de diploma). Perú: Universidad Nacional de Altiplano; 2017. [repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/7044](http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/7044).
12. Fernández García J. Estudio de pérdidas técnicas en las redes eléctricas de distribución (Tesis de grado). España: Universidad Carlos III de Madrid; 2017. [https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/27368/TFG\\_Jon\\_Fernandez\\_Garcia.pdf](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/27368/TFG_Jon_Fernandez_Garcia.pdf).
13. Crespo Sánchez G. Revisión de la asignación de interruptores en la reconfiguración de redes de distribución para maximizar la confiabilidad y minimizar los costos. Universidad y Sociedad. 2018; 11(1) <http://scielo.sld.cu/pdf/rus/v11n1/2218-3620-rus-11-01-339.pdf>.
14. Villacres F y Inga E. Planeación y dimensionamiento de redes eléctricas de distribución soterrada mediante un método metaheurístico. Ingeniería y Ciencia. 2019; 15(30) <http://www.scielo.org.co/pdf/ince/v15n30/1794-9165-ince-15-30-141.pdf>.
15. Borges Vasconcellos DE y Concepción Céspedes Y. Compensación de potencia reactiva en sistemas de distribución primaria de energía, aplicando algoritmos genéticos. Revista de Ingeniería Energética. 2017; XXXVIII(1) <http://scielo.sld.cu/pdf/rie/v38n1/rie04117.pdf>.
16. Borges Vasconcellos D, Puch González P y Frías González G. Control de demanda eléctrica aplicando algoritmos genéticos. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería. 2017; 25(3) <https://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v25n3/0718-3305-ingeniare-25-03-00389.pdf>.
17. Pérez Abril I, Herrera Casanova R y Álvarez Fleites O. Balanceo de Fases en Circuitos de Distribución de Santa Clara. Revista de Ingeniería Energética. 2017; Vol XXXVIII(3) <http://scielo.sld.cu/pdf/rie/v38n3/rie04317.pdf>.
18. López Bastida EJ y Álvarez Sánchez Y. Evaluación ambiental de la transmisión y distribución de energía eléctrica en Cienfuegos. Universidad y Sociedad. 2018; 10(5) <http://scielo.sld.cu/pdf/rus/v10n5/2218-3620-rus-10-05-313.pdf>.
19. Bravo , de las Casas Marta, y otros. Balanceo de cargas en los circuitos de distribución de un sistema eléctrico aislado que garantiza operación segura ante ocurrencias de averías. Ingeniería y desarrollo. 2019; 37(1) <http://www.scielo.org.co/pdf/inde/v37n1/2145-9371-inde-37-01-00001.pdf>.
20. Anaut DO. Optimización de Redes Eléctricas Mediante la Aplicación de Algoritmos Genéticos. Información Tecnológica. 2009; 20 (4) <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v20n4/art16.pdf>.
21. Amanqui Quispe MS. Metodología de reconfiguración de redes primarias de la subestación de transformación San Lázaro para garantizar la confiabilidad del servicio eléctrico en la zona céntrica de Arequipa (Tesis maestría). Perú: Universidad Nacional San Agustín; 2018. <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/6811/ELMamqus.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
22. Inga E y Campaña M . Óptima planeación de recursos para redes eléctricas inteligentes usando modelos heurísticos In: INGA ORTEGA, E., ed. Aplicaciones e innovación de la ingeniería en ciencia y tecnología [online]. Quito: Editorial Abya-Yala; 2019. <http://books.scielo.org/id/hcnhr/pdf/inga->



9789978104910-03.pdf.

23. Yero Peña W. Monitoreo, control y diagnóstico en bancos de capacitores automáticos en baja tensión. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*. 2018; 26(1) <https://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v26n1/0718-3305-ingeniare-26-01-00028.pdf>.

24. Guadalupe Arellano IJ. Análisis de la eficiencia del banco de condensadores por incremento de potencia activa en la subestación eléctrica de Chimay, provincia de Jauja, región Junín (Trabajo de diploma). Perú: Universidad Continental; 2020. [https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/8446/1/IV\\_FIN\\_109\\_TE\\_Guadalupe\\_Arellano\\_2020.pdf](https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/8446/1/IV_FIN_109_TE_Guadalupe_Arellano_2020.pdf).

25. Sardina Oliva O. Reconfiguración de redes eléctricas para la disminución de pérdidas en el municipio Manatí (Trabajo de Diploma). Cuba: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa; 2017. <https://1library.co/document/zp0x5drq-reconfiguracion-redes-electricas-disminucion-perdidas-municipio-manati.html>.

Recibido: 6 julio de 2023

Aceptado: 12 de setiembre de 2023

El (los) autor(es) de este artículo declara(n) que:

Este trabajo es original e inédito, no ha sido enviado a otra revista o soporte para su publicación.

Está(n) conforme(s) con las prácticas de comunicación de Ciencia Abierta.

Ha(n) participado en la organización, diseño y realización, así como en la interpretación de los resultados.

Luego de la revisión del trabajo, su publicación en la revista *Pedagogía Profesional*.

NO HAY NINGUN CONFLICTO DE INTERÉS con otras personas o entidades