

# Reconfiguración de bloques de carga en la red de distribución del municipio Camagüey

## *Reconfiguration of load blocks in the distribution network of the Camagüey municipality*

Jorday Arostegui Morell<sup>I</sup>, Eduardo Sierra Gil<sup>II, \*</sup>, Jorge Luis Jorge Guerra<sup>I</sup>, Mirelma Nordelo Escudero<sup>I</sup>, Yabel Cansino Veloso<sup>I</sup>, Emigdio Rafael Cabrero Manresa<sup>I</sup>

<sup>I</sup>Empresa Eléctrica Camagüey, Camagüey, Cuba

<sup>II</sup>Universidad de Camagüey “Ignacio Agramonte Loynaz”, Camagüey, Cuba

\*Autor de correspondencia: [eduardo.sierra@reduc.edu.cu](mailto:eduardo.sierra@reduc.edu.cu)

Recibido: 5 de noviembre de 2022 Aprobado: 6 de enero de 2022

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



### RESUMEN/ABSTRACT

El municipio Camagüey posee una red de distribución compleja, resultante de la interacción de los circuitos provenientes de sus cuatro subestaciones de transmisión 110/13.8 kV y el uso de bloques de carga. En este trabajo se realizó una evaluación de las posibles combinaciones para la reconfiguración de los bloques de carga con el objetivo de determinar la que resulte más efectiva en la reducción del consumo de energía eléctrica del municipio, mediante la reducción de las pérdidas técnicas. El análisis de las configuraciones de la red de distribución se realizó en el software DigSILENT Power Factory. La validación fue realizada mediante la comparación entre la energía consumida por la red de distribución antes y después de realizar los cambios en la configuración, a partir de las lecturas tomadas de los metrocontadores de las subestaciones. Al cierre de un año de aplicación se ahorraron más de 8215.14 MWh.

**Palabras clave:** Bloques de carga, pérdidas técnicas, flujo de carga, reconfiguración de redes de distribución.

*The municipality of Camagüey has a complex distribution network, resulting from the interaction of the circuits coming from their four 110/13.8 kV transmission substations and the use of load blocks. In this work, an evaluation of the possible combinations for the reconfiguration of the load blocks was carried out to determine the one that is most effective in reducing the electricity consumption of the municipality, by reducing technical losses. The analysis of the distribution network configurations was carried out in the DigSILENT Power Factory software. The validation was carried out by comparing the energy consumed by the distribution network before and after making the changes in the configuration, based on the readings taken from the substation meters. At the end of one year of application, more than 8,215.14 MWh were saved.*

**Keywords:** Load blocks, Technical losses, load flow, reconfiguration of distribution networks.

### INTRODUCCIÓN

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[1]. Los métodos de reducción de pérdidas técnicas más empleados son: ubicación de capacitores, cambio de conductor, elevación de los niveles de tensión de servicio, y la reconfiguración[2-4]. 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 [5-7].

Cómo citar este artículo:

Jorday Arostegui Morell, et al. Reconfiguración de bloques de carga en la red de distribución del municipio Camagüey. Ingeniería Energética. 2023. 44(1), enero/abril. ISSN: 1815-5901.

Sitio de la revista: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/index>

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 [8]. Las redes de distribución se operan radiales y se construyen malladas, por lo tanto, es posible intercambiar carga de un alimentador a otro, hasta obtener un punto de operación adecuado. La reconfiguración de alimentadores primarios es la alteración de la estructura topológica a partir de la apertura o el cierre de seccionizadores que son interruptores normalmente cerrados (NC) y los enlaces que son interruptores normalmente abiertos (NA). A su vez, es el proceso por medio del que se transfieren cargas de un alimentador a otro, teniendo en cuenta las restricciones de los parámetros de operación de la red y la topología de los circuitos [9,10]. La topología que se seleccione debe cumplir con las restricciones mínimas que son: conservar la configuración radial de los alimentadores; todas las cargas deben ser servidas; los límites térmicos de líneas, transformadores y otros equipos no deben ser excedidos; los niveles de tensión tienen que quedar dentro de los límites establecidos.

La red de distribución del municipio Camagüey posee cuatro subestaciones de transmisión de 110/13.8 kV, y su red de distribución es mallada, flexibilizando la operación del sistema. En el diseño de la red se evidencia el uso de bloques de carga, los cuales constituyen secciones que pueden ser energizadas por dos o más alimentadores. Con el propósito de reorganizar la distribución del municipio Camagüey se comenzó la investigación a partir del estudio de los bloques de carga con el objetivo general de determinar de las posibles combinaciones existentes para operar la red, la que resulte más eficiente y así poder disminuir el consumo de energía eléctrica del municipio al disminuir las pérdidas técnicas, reduciendo el combustible a utilizar al reducir el consumo de la red.

El artículo está estructurado en dos secciones, en la sección de Materiales y métodos se fundamenta teóricamente el método utilizado para la reconfiguración de los circuitos, se realiza la formulación del problema de optimización, con la función objetivo y sus restricciones y se describe la herramienta informática utilizada para la simulación; en la sección Resultados y discusión, se valora el impacto obtenido al aplicar los cambios topológicos, que arrojó la simulación, en la red de distribución del municipio Camagüey, en términos de reducción del consumo de energía, de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y del ahorro de combustible por concepto de generación evitada a partir de la reducción de las pérdidas técnicas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Minimización de pérdidas de potencia en sistemas de distribución basada en la reconfiguración de redes

Las pérdidas de potencia activa son las pérdidas técnicas que pueden reducir la eficiencia general del sistema de distribución. Para formular las pérdidas como un único objetivo en la reconfiguración se emplean las siguientes ecuaciones (1 y 2):

$$\Delta P = \sum_{b=1}^n R_b \cdot \left( \frac{P_b^2 + Q_b^2}{V_b^2} \right) \quad (1)$$

$$\Delta P = \sum_{b=1}^n R_b \cdot |I_b|^2 \quad (2)$$

Donde:  $\Delta P$  representa las pérdidas de potencia activa totales del sistema,  $R_b$  la resistencia de la derivación,  $I_b$  la corriente que circula en la derivación,  $P_b$  la potencia activa de la derivación,  $Q_b$  la potencia reactiva de la derivación,  $V_b$  la tensión en la barra,  $N$  el número total de barras y  $M$  el total de ramas en el sistema de distribución, como se muestra en la figura 1. La corriente de bifurcación y las tensiones de barra pueden evaluarse a través del análisis de flujo de potencia [10].

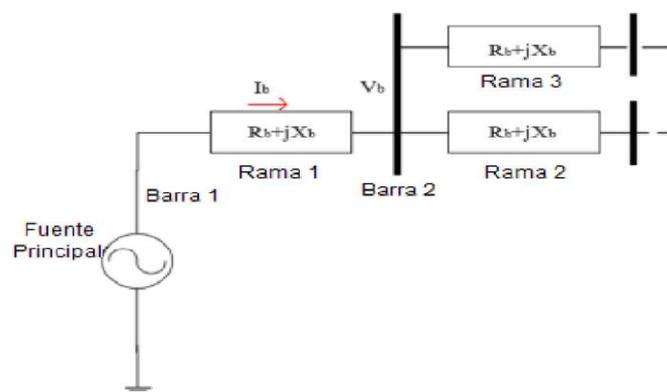


Fig. 1. Diagrama monolineal de un ejemplo de red de distribución [10]

El proceso de reconfiguración para minimizar las pérdidas está, además, sometido a las siguientes restricciones

Restricción de tensión (para tensión nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV[11]):

$$0.93 \text{ p.u.} \leq V_i \text{ (p.u.)} \leq 1.05 \text{ p.u.}, i \in (1; 2; \dots; n_b)$$

donde  $V_i$  es el valor de la tensión de la barra  $i$  y  $n_b$  el número de barras del sistema.

Restricción de corriente:

$$I_j \leq I_{j,\max}, j \in (1; 2; \dots; n_r)$$

donde  $I_j$  es el valor de la corriente de la rama  $j$ ,  $I_{j,\max}$  la máxima corriente admisible de la rama  $j$  y  $n_r$  el número de ramas del sistema.

Restricción de topología del sistema: La red debe ser de topología radial, o sea, no pueden existir mallas en el sistema. Además, todas las barras del sistema deben estar energizadas. Así mismo, cada barra debe estar energizada solamente desde una subestación alimentadora.

Los algoritmos de reconfiguración se pueden clasificar por los métodos de solución que emplean: los que se basan en una combinación de métodos heurísticos y de optimización, los que utilizan solamente la heurística y los que emplean la inteligencia artificial (IA)[12–14]. Las técnicas heurísticas y de optimización permiten lograr que el problema tenga cierto grado de precisión, a la vez que garantiza la convergencia y un tiempo de solución aceptable. Civanlar (1988), desarrolla un método de intercambio de líneas que considera las posiciones abierto/cerrado de los interruptores seccionalizadores como números discretos. Este es un método heurístico confiable y muy rápido puesto que disminuye ostensiblemente la cantidad de flujos de carga que deben ser corridos, por lo que se ha convertido en el método más utilizado para la reconfiguración de alimentadores. plantea la alta posibilidad de obtener disminución de pérdidas cuando se transfieren cargas de un nodo I a un nodo II, siempre y cuando el voltaje del nodo I sea mayor[15]. La magnitud en la cual cambian las pérdidas como resultado de la transferencia de un grupo de cargas de un alimentador I a otro alimentador II aparece en la figura 2, y puede estimarse a partir de la ecuación (3).

$$\Delta P = R_e \left\{ 2 \cdot \left( \sum_{i \in D} I_i \right) \cdot (E_m - E_n) \right\} + R_{\text{lazo}} \cdot \left[ \sum_{i \in D} I_i \right]^2 \quad (3)$$



Fig 2. Sistema de distribución para ilustrar el método de Civanlar[3]

Donde:

D: Grupo de nodos desconectados del alimentador II y conectados al alimentador I.

m: Nodo de enlace del alimentador I al cual se conectarán las cargas que provienen del alimentador II.

n: Nodo de enlace del alimentador II que será conectado al nodo m a través de un dispositivo de corte de enlace.

$I_i$ : corriente compleja en el nodo  $i$ .

$R_{\text{lazo}}$ : Resistencia en serie del camino que conecta los dos nodos de las subestaciones del alimentador I y del alimentador II a través del cierre del dispositivo de corte de enlace especificado.

$E_m$ : Componente de  $E = R_{\text{nodo}} I_{\text{nodo}}$  correspondiente al nodo m.

$R_{\text{nodo}}$  es la matriz de resistencia de nodos del alimentador I, antes de la transferencia de carga, que se calcula usando el nodo de la subestación como referencia.

$I_{\text{nodo}}$  es el vector de corrientes de nodo para el alimentador I.

$E_n$ : Similar a  $E_m$  pero definido para el nodo n del alimentador II.

$\text{Re} \{ \cdot \}$ : Operador de parte real.

\*: Operador complejo conjugado.

$|\cdot|$ : Operador magnitud.

### Flujo de potencia trifásico

El principal inconveniente en el estudio de flujo de potencia es que, a lo largo de los años, la gran mayoría de los trabajos de investigación se han limitado al modelado y análisis de sistemas trifásicos equilibrados, requiriendo solamente la representación de una única fase para el cálculo del flujo de potencia.

Aunque esto funciona bien para sistemas de transmisión, puede resultar inadecuado para sistemas de distribución debido a la presencia de cargas desbalanceadas, a la radialidad de la red y al hecho de que la resistencia de las líneas puede ser comparable en magnitud con la reactancia de las líneas [16]. En estudios de flujo de potencia para sistemas de distribución, se puede destacar el algoritmo del método de barrido iterativo de suma de corrientes (backward/forward sweep) presentado en [17], el cual aprovecha la naturaleza radial de los sistemas de distribución y no sufre inconvenientes con las características particulares de estos sistemas, tales como, líneas sin transposición, cargas de distinta naturaleza, múltiples conexiones y alto valor de R/X de las líneas de distribución.

Además, el algoritmo (backward/forward sweep) tiene excelente rendimiento computacional para sistemas radiales y es de fácil implementación para sistemas con 4 conductores (tres fases y un neutro). Dicho algoritmo es implementado en este trabajo. Detalles del algoritmo se encuentran en [18]. Para la implementación del flujo de potencia trifásico, se debe realizar el modelado de cada componente del sistema, en el cual se tienen dos grupos diferentes de componentes: (I) Serie (componentes o equipamientos conectados entre dos barras), y (II) Shunt (componentes conectados a una única barra y a tierra) [13].

### Formulación del problema

El problema de reconfiguración fue planteado como un problema de optimización, en donde se buscaminimizar las pérdidas totales de potencia activa, que se calculan para cada una de las fases y para cada ramificación de los sistemas de distribución a ser estudiados, la función objetivo se muestra en la ecuación (4).

$$f = P_{total} = \sum_{i=1}^{n_r} R_i \cdot |I_i|^2 \quad (4)$$

donde Ptotal es la pérdida de potencia activa total del sistema, nr, es el número de ramificaciones del sistema, Ri es la resistencia de la ramificación i e Ii la corriente de la ramificación i.

La simulación se desarrolló mediante el programa DigSilent PowerFactory, este software especializado permite el criterio de apertura y cierre de los seccionadores para la minimización de las pérdidas de potencia activa durante la reconfiguración, considerando las restricciones de tensión, corriente y topología [6,19].

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la simulación en DigSilent Power Factory arrojaron un total de seis cambios topológicos en la red de distribución del municipio Camagüey, y la reconfiguración fue aplicada en un periodo de 3 meses para realizar mediciones y validar los resultados de la simulación. Los cambios de esquema fueron los siguientes:

Cambio de esquema entre el Y319 y el Y123, el estudio entre estos circuitos mostró que el bloque de carga entre la C70 y la C222 que se alimentaba por el Y123 debía pasar al Y319; en las figuras 3a y 3b se muestran, como ejemplo, el bloque de carga y los dispositivos seccionalizadores entre los dos circuitos y el diagrama monolineal del esquema reconfigurado.

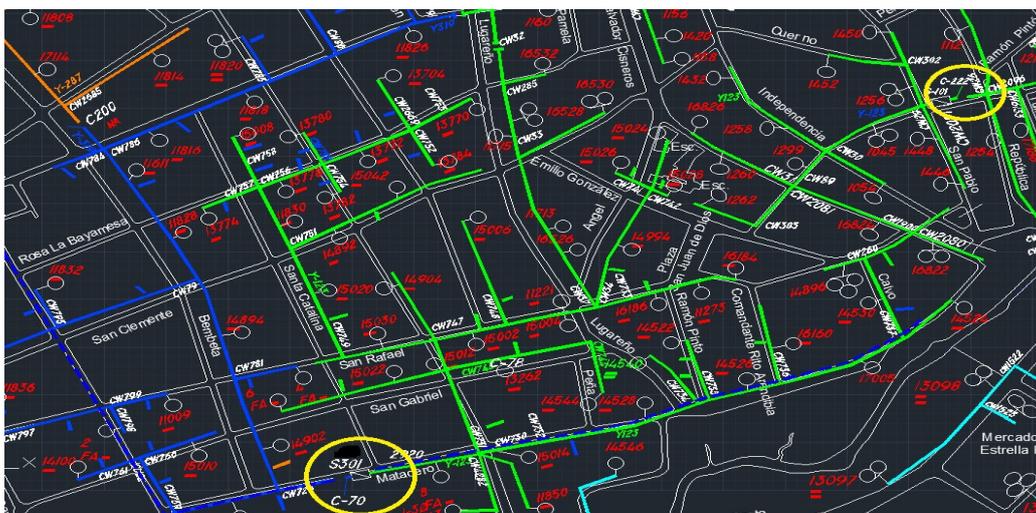


Fig. 3a. Bloque de carga entre los dispositivos seccionalizadores C-70 y C-222

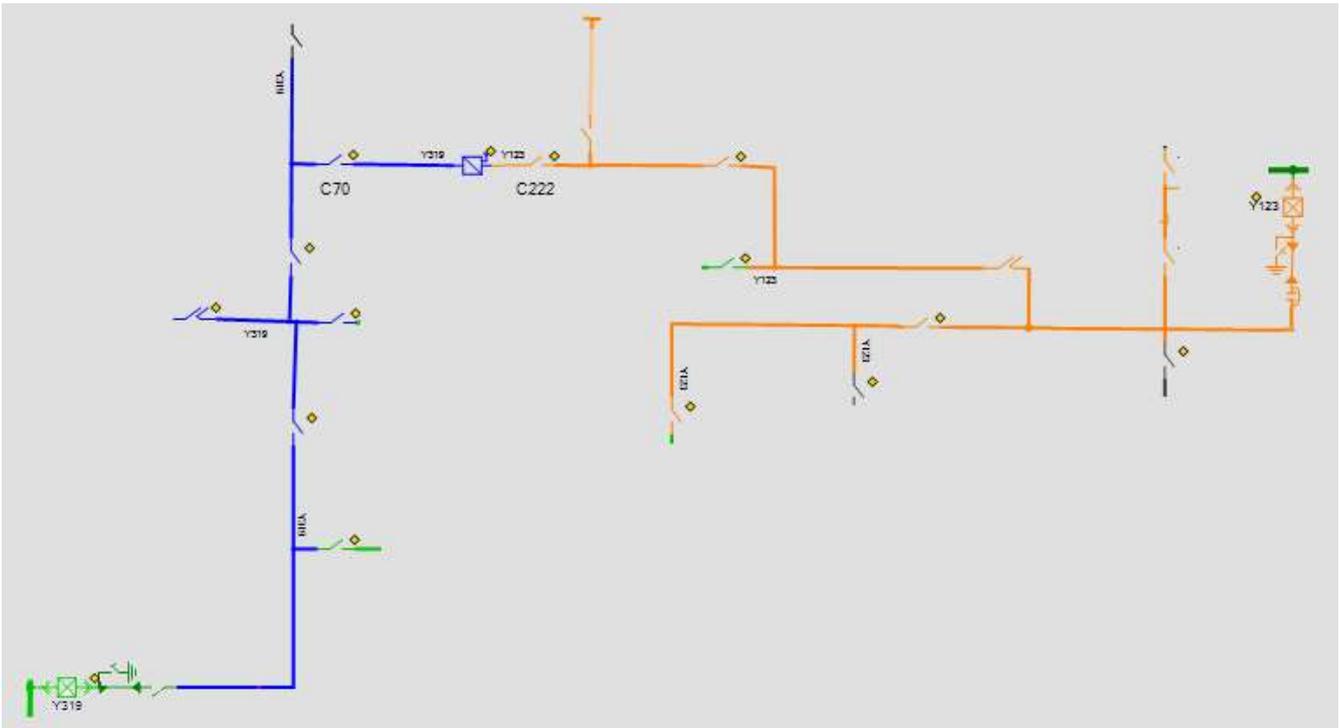


Fig. 3b. Diagrama monolineal del esquema reconfigurado

Las manipulaciones fueron realizadas y se evidenció una disminución entre estos circuitos de unos 10.5 MWh como promedio diario. Al plazo de un año disminuye del consumo de la provincia unos 3 832.5 MWh. La figura 4, muestra la tendencia de reducción del consumo de ambos circuitos.

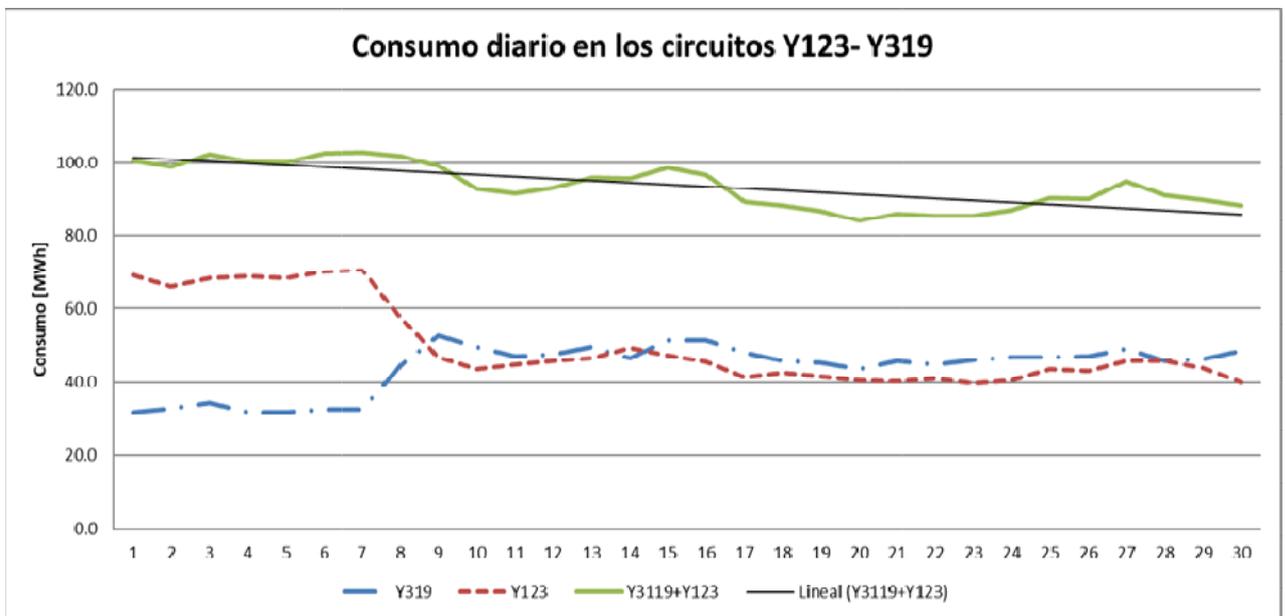


Fig. 4. Comparación entre los esquemas Y123- Y319

Cambio de esquema entre el Y283 y el Y282, se evidenció una disminución en estos circuitos de 2.5 MWh como promedio diario. La figura 5, muestra la tendencia de reducción del consumo de ambos circuitos.

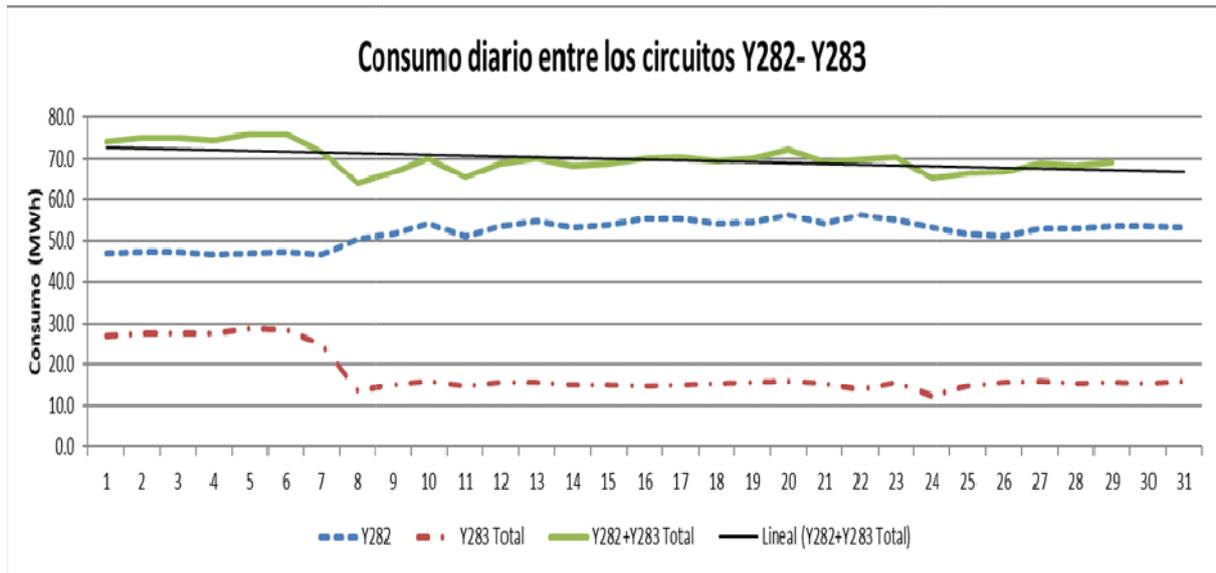


Fig. 5. Comparación entre los esquemas Y282- Y283

Cambio de esquema entre el Y430 y el Y440, al salir de servicio la C248 del circuito Y440, la sección (C248-C254-C275) queda alimentada por la C254 al Y430, y modificó la configuración alimentando dicha sección por la C275 del Y440, permitiendo disminuir unos 12.09 MWh como promedio diario. Hasta el restablecimiento de la configuración anterior cuando se cambió el polo de la fase A y se dejó cerrada la C248 se ahorraron unos 217.62 MWh en 18 días. Ante esta situación se acordó que este bloque de carga en esquema normal es alimentado por la C248, como primera variante la C275 y en última instancia la C254. La figura 6, muestra la tendencia de reducción del consumo de ambos circuitos.

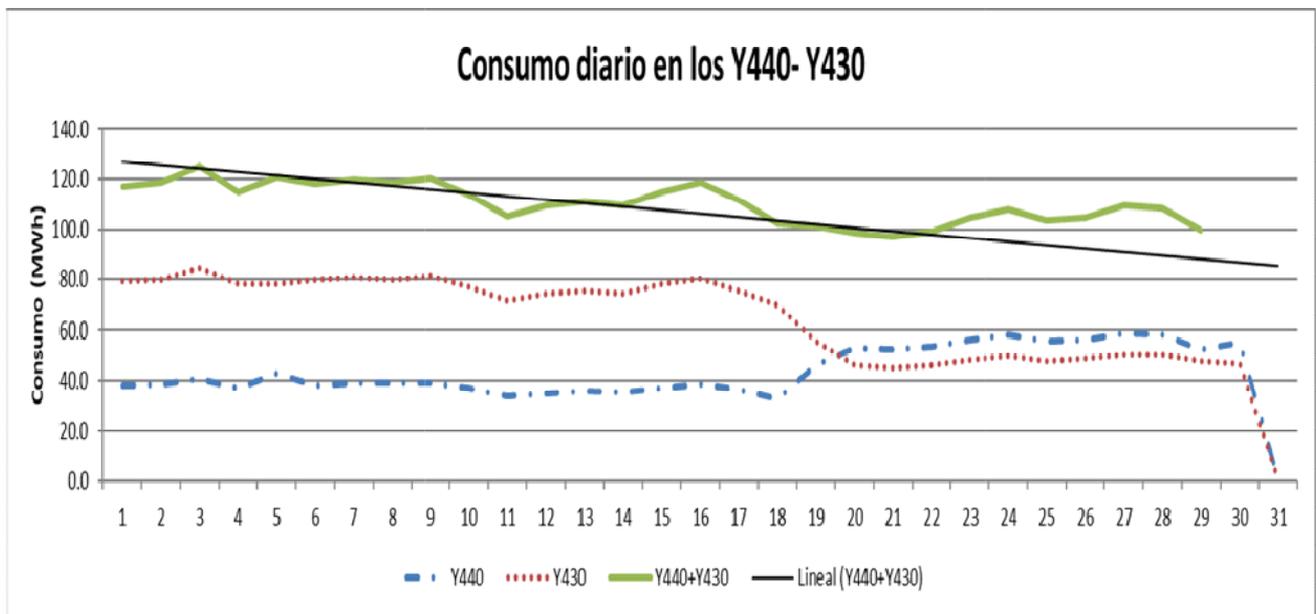


Fig. 6. Comparación entre los esquemas Y440- Y430

Cambio de esquema entre el Y285 y el Y410, se abrió la C216 y se cerró la C215. Así se logró disminuir unos 3.73 MWh como promedio diariamente, que en los 56 días en que estuvo aplicado se redujo el consumo en unos 208.88 MWh. La figura 7, muestra la tendencia de reducción del consumo de ambos circuitos.

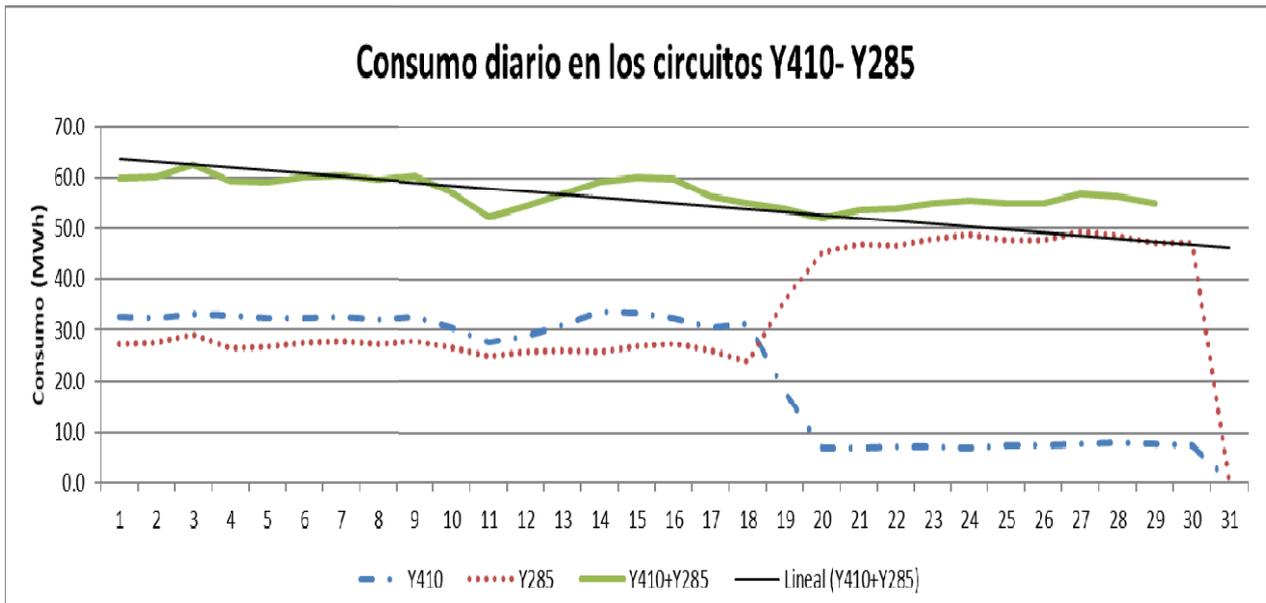


Fig.7. Comparación entre los esquemas Y410- Y285

Cambio de esquema entre el Y314 y el Y286, al abrir la C62 y la C107, cerrar la C85 y la C86, el bloque de carga del Porvenir es alimentado por el Y286. Se logró una reducción del consumo del municipio de unos 7.29 MWh como promedio diario. En un plazo de un año este esquema reduce unos 2 660.85 MWh del consumo de energía del municipio. La figura 8, muestra la tendencia de reducción del consumo de ambos circuitos.

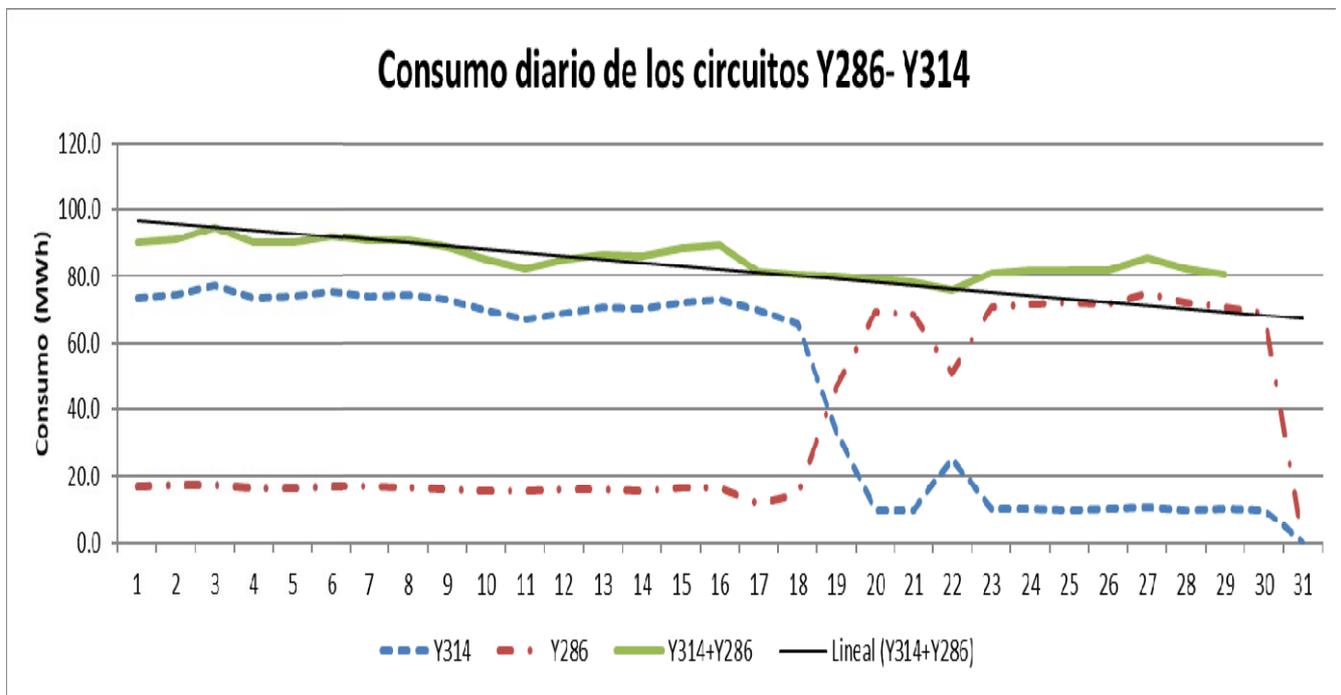


Fig. 8. Comparación entre los esquemas Y286- Y314

Cambio de esquema entre el Y102 y el Y112. Ante la salida del alimentador Y117, el Y102 sirve al bloque de carga de la C190- C128, aumentando la carga de dicho circuito, se realizó la reconfiguración, alimentando la sección entre la C176- C121 por el Y112, evidenciando una reducción diaria del consumo de energía de 3.79 MWh. La figura 9, muestra la tendencia de reducción del consumo de ambos circuitos.

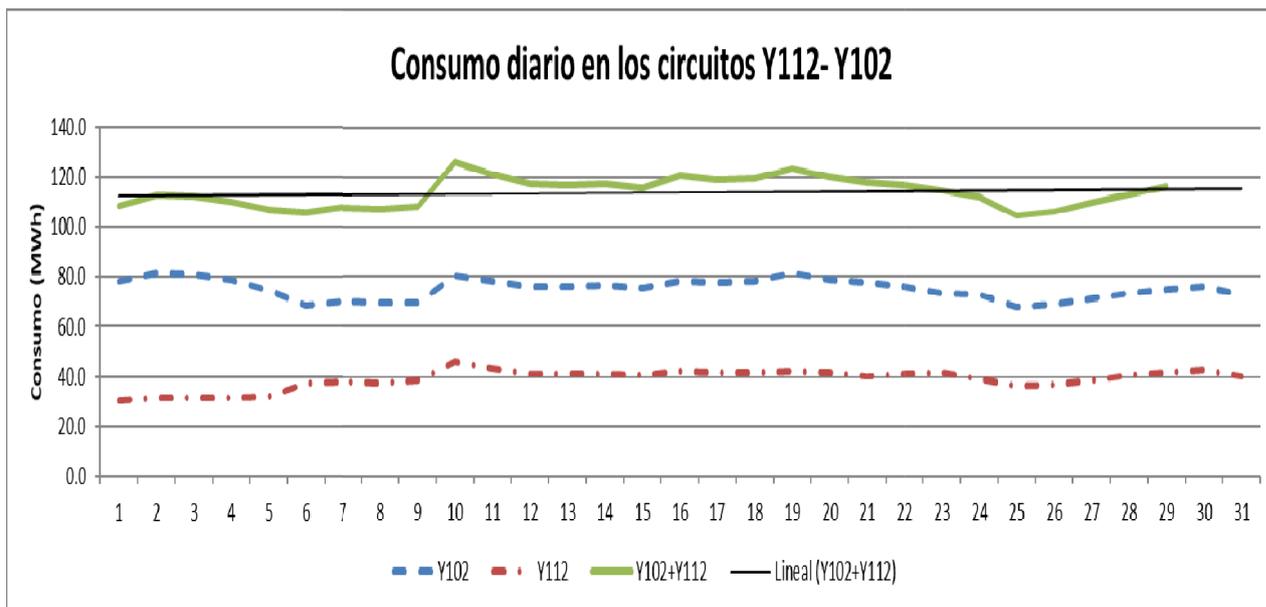


Fig.9. Comparación entre los esquemas Y112- Y102

Durante el tiempo que se aplicaron las variantes de reconfiguración de la red de distribución del municipio obtenidas mediante la simulación en DigSilent Power Factory, se estimó que se dejaron de emitir, como promedio más 6,974.65 toneladas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y se produjo un ahorro de 2,135.93 toneladas combustible por concepto de generación evitada a partir de la reducción de las pérdidas técnicas.

## CONCLUSIONES

El método de reconfiguración de Civanlar adaptado a la reconfiguración de las redes de distribución del municipio Camagüey resultó efectivo y rápido. La utilización de la programación en DigSilent Power Factory es una herramienta que permite obtener la reconfiguración más adecuada para reducir las pérdidas técnicas en las redes de distribución. A través de la metodología y herramientas propuestas se realizó el estudio de la reconfiguración de la red de distribución del municipio Camagüey y los resultados fueron aplicados con una significativa reducción del consumo de energía en los circuitos evaluados. Se demuestra que se pueden reducir las pérdidas técnicas de la red sin realizar inversiones significativas. Es posible ahora continuar los estudios de distribución a partir de esquemas reconfigurados que pueden ser mejorados con una expansión mínima de la red de distribución, ante incrementos futuros de carga.

## REFERENCIAS

- [1] Salazar-Fonseca, I., *et al.* "Reconfiguración Multiobjetivo En Sistemas de Distribución Primaria de Energía." *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 2017, vol. 25, n. 2, p. 196–204. [Consultado el: 11 de febrero de 2022]. Disponible en: <https://doi.org/10.4067/S0718-33052017000200196>
- [2] Lopez Roldan, K. F., and Urquizo Calderón, J. "Ubicación y dimensionamiento óptimo de bancos de capacitores para la minimización de pérdidas de potencia activa en una red de distribución radial mediante la utilización de Métodos Heurísticos de Colonia de Hormigas y algoritmo genético". *bachelorThesis. Espol*, 2018. [Consultado el: 15 de febrero de 2022]. Disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/47549/DCD106666.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [3] Medel, M., and Casas, L. "Reconfiguración de la red de 33 kV para pérdidas mínimas con generación distribuida en Villa Clara". *Ingeniería Energética*, 2008, vol. 29, n. 1, p. 62–68. [Consultado el: 1 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/article/view/74>
- [4] Trujillo, L. A., *et al.* "Validación de la factibilidad técnica de una nueva subestación eléctrica como solución a pérdidas técnicas en la distribución de energía en la Empresa Eléctrica Pinar del Río." *Avances*, vol. 15, n. 4, 2015, p. 374–384. [Consultado el: 1 de marzo de 2022]. Disponible en: <http://avances.pinar.cu/index.php/publicaciones/article/download/118/285?inline=1>
- [5] García-Labrada, A., and Silva-Cala, Y. "Estudio de la reconfiguración de las redes 34.5kV para la puesta en marcha de la subestación Velasco 110kV." *Ciencia & Futuro*, vol. 8, n. 3, 2018, p. 108–123. [Consultado el: 1 de marzo de 2022]. Disponible en: [http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revista\\_estudiantil/article/view/1637/1116](http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revista_estudiantil/article/view/1637/1116)

- [6] Monar Arguello, D. C. "Esquema de reconfiguración en la red eléctrica en el sistema de distribución considerando restricciones de voltaje". bachelorThesis. 2022.[Consultado el: 17 de octubre de 2022].Disponible en:<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/22569/1/UPS%20-%20TTS805.pdf>
- [7] Toledo Gómez, L. J. "Configuración de redes de distribución eléctricas de la cfe para la reducción de pérdidas técnicas de los circuitos cri-04030, cri-04040, cri-04050 de la subestacion san cristobal." Tecnológico nacional de México. Instituto tecnológico de tuxtla gutierrez. 2018.[Consultado el: 1 de marzo de 2022].Disponible en: <http://repositoriodigital.tuxtla.tecnm.mx/xmlui/bitstream/handle/123456789/2171/MDRPIECA2018041.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [8] Aquino Paco, S. "Aplicación de una metodología de reconfiguración de redes de distribución para reducir pérdidas Resistivas en la Línea." Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 2018.[Consultado el: 1 de marzo de 2022]. Disponible en: <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/7277>
- [9] Cattani, I. A. B. "R1 Planeamiento de la Operación y Expansión de Sistemas de Distribución mediante la Reconfiguración de la Red." IEEE Latin America Transactions, vol. 18, n. 5, 2020, p. 845–852. [Consultado el: 1 de marzo de 2022]. Disponible en: [https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642014000100010&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642014000100010&script=sci_arttext)
- [10] Crespo Sánchez, G., *et al.* "Revisión de La Asignación de Interruptores En La Reconfiguración de Redes de Distribución Para Maximizar La Confiabilidad y Minimizar Los Costos." Revista Universidad y Sociedad, vol. 11, n. 1, 2019, p. 339–349.[Consultado el: 1 de marzo de 2022].Disponible en: <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/1135>
- [11] IEC 60038:2009+AMD1:2021 Edition 7.1. Normadoc. [Consultado el: 1 de marzo de 2022].Disponible en: <https://www.normadoc.com/spanish/iec-60038-2009-amd1-2021-edition-7-1.html>
- [12] Quintero, José Angel Gonzales, *et al.* "Algoritmo Heurístico Para La Reconfiguración de Sistemas de Distribución Mediante Intercambio de Ramas". Ingeniería Energética. 2012, vol. 33, n. 3. [Consultado el: 1 de marzo de 2022]. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59012012000300003&script=sci\\_arttext&lng=en](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59012012000300003&script=sci_arttext&lng=en)
- [13] Benitez Cattani, I., Chaparro, E., and Barán, B. "Distribution System Operation and Expansion Planning Using Network Reconfiguration." IEEE Latin America Transactions, vol. 18, n. 05, 2020, p. 845–852. [Consultado el: 1 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9082912>
- [14] Torres, W. de J. T., *et al.* "Reduction of Electrical Energy Technical Losses in the Metropolitan Area of Bucaramanga (AMB) Using Network Reconfiguration Based on Exhaustive Search". Presented at the 2019 FISE-IEEE/CIGRE Conference - Living the energy Transition (FISE/CIGRE), 2019.[Consultado el: 8 de abril de 2022]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8984987>
- [15] Civanlar, S., *et al.* "Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction." IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 3, n. 3, 1988, p. 1217–1223. [Consultado el: 8 de abril de 2022].Disponible en: <https://doi.org/10.1109/61.193906>
- [16] Mahmoud, K., and Abdel-Akher, M. "Efficient Three-Phase Power-Flow Method for Unbalanced Radial Distribution Systems". Presented at the Melecon 2010 - 2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, 2010. [Consultado el: 15 de febrero de 2011].Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5476323>
- [17] Mendive, David Lee. "An Application of Ladder Network Theory to the Solution of Three-Phase Radial Load-Flow Problems". New Mexico University, Thesis.[Consultado el: 8 de abril de 2022]. Disponible en: <https://www.worldcat.org/es/title/application-of-ladder-network-theory-to-the-solution-of-three-phase-radial-load-flow-problems/oclc/1895584>
- [18] Kersting, W. H. "Distribution System Modeling and Analysis". CERN Document Server.[Consultado el: 11 de febrero de 2022]. Disponible en: <https://cds.cern.ch/record/995108>
- [19] Pineda Rojas, D. "Implementación de algoritmo computacional para el estudio de confiabilidad y flujo de carga en sistemas eléctricos de distribución a través del software DigSilent: Caso de estudio Rbts de 7 feeders."Universidad distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Ingeniería, Proyecto curricular de Ingeniería Eléctrica Bogotá D.C. Colombia, 2021.[Consultado el: 8 de abril de 2022]. Disponible en: <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/27573/PinedaRojasDaniel2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

**Jorday Arostegui Morell:**<https://orcid.org/0000-0001-9330-6161>

Diseño de la investigación, recolección de datos y procesamiento, simulación. participó en el análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo y en la aprobación final.

**Eduardo Sierra Gil:**<http://orcid.org/0000-0001-5216-2771>

Diseño de la investigación, simulación. participó en el análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

**Jorge Luis Jorge Guerra:**<https://orcid.org/0000-0003-0039-7864>

Recolección de datos, simulación. participó en el análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo y en la aprobación final.

**Mirelma-Nordelo Escudero:**<https://orcid.org/0000-0003-1172-6803>

Recolección de datos, simulación. participó en el análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo y en la aprobación final.

**Yabel Cansino Veloso:**<https://orcid.org/0000-0002-7057-5817>

Recolección de datos, simulación. participó en el análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo y en la aprobación final.

**Emigdio Rafael Cabrero Manresa:**<https://orcid.org/0000-0002-2234-7369>

Recolección de datos, simulación. participó en el análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo y en la aprobación final.