

Tipo de artículo: Artículo original

# Despliegue óptimo de redes de distribución y generación distribuida para microrredes eléctricas híbridas CA aisladas usando método heurístico

## *Optimal deployment of distribution networks and distributed generation for isolated AC hybrid micro-grids using heuristic method*

Ángel Josué Pérez Pazmiño<sup>1\*</sup> , <https://orcid.org/0000-0003-3473-5067>  
Leony Ortiz Matos<sup>2</sup> , <https://orcid.org/0000-0002-7883-5513>

<sup>1</sup>Carrera de Electricidad. Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador. [aperezp1@est.ups.edu.ec](mailto:aperezp1@est.ups.edu.ec)

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería Eléctrica. Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador. [mariaf.nagua@educacion.gob.ec](mailto:mariaf.nagua@educacion.gob.ec)

\* Autor para correspondencia: [aperezp1@est.ups.edu.ec](mailto:aperezp1@est.ups.edu.ec)

### Resumen

Las microrredes eléctricas pueden ser definidas como una agregación de cargas y pequeñas fuentes generadoras de energía operando como un único sistema de potencia y calor. En la investigación se abordan las microrredes como una solución optimizada y escalable en poblaciones de Guayaquil, Ecuador, que presentan características de crecimiento constante, con una demanda de energía eléctrica cada día mayor. Esta situación ha provocado constantes caídas de voltaje y pérdida de potencia en las líneas eléctricas por el desabastecimiento de energía a la red por la elevada demanda. Es por ello que la implementación de microrredes eléctricas constituiría una solución factible, bien sea para operar de manera conectada a la red eléctrica o en modo aislado, constituyendo otra ventaja de su implementación. Sin embargo, la selección óptima de la ubicación de los centros de generación distribuida y el despliegue de las redes de distribución constituye un problema actualmente. El objetivo de la investigación es desarrollar un método heurístico basado en K-medias, árbol de expansión mínima y fuerza bruta que permita el despliegue óptimo de redes de distribución y generación distribuida para microrredes eléctricas híbridas CA aisladas. La investigación tiene un diseño de investigación no experimental, con alcance descriptivo y enfoque cuantitativo. Se desarrolló un método heurístico que permita el despliegue óptimo de redes de distribución y generación distribuida para microrredes eléctricas híbridas CA aisladas. La propuesta de solución obtenida, basada en un método heurístico de la familia de los algoritmos de fuerza bruta o búsqueda exhaustiva, es novedosa, busca la solución óptima, es finito, escalable y de bajo costo computacional. La misma constituye una solución innovadora para la selección óptima de los centros de generación distribuida y el despliegue de las redes de distribución, específicamente en la ubicación de paneles solares, generadores diésel y transformadores.

**Palabras clave:** generación distribuida; despliegue óptimo; líneas de distribución; métodos heurísticos; microrredes eléctricas.

### Abstract

*Electric microgrids can be defined as an aggregation of loads and small power generating sources operating as a single power and heat system. The research addresses microgrids as an optimized and scalable solution in towns in Guayaquil, Ecuador, which present characteristics of constant growth, with an ever-increasing demand for electricity. This situation has caused constant voltage drops and power loss in power lines due to the lack of power to the grid due to high demand. That is why the implementation of electrical microgrids would constitute a feasible solution, either to operate in a connected way to the electrical*



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional** (CC BY 4.0)

network or in isolated mode, constituting another advantage of its implementation. However, the optimal selection of the location of distributed generation centers and the deployment of distribution networks is currently a problem. The objective of the research is to develop a heuristic method based on K-means, minimum spanning tree and brute force that allows the optimal deployment of distribution networks and distributed generation for isolated AC hybrid electrical microgrids. The research has a non-experimental research design, with a descriptive scope and a quantitative approach. A heuristic method was developed that allows the optimal deployment of distribution networks and distributed generation for isolated AC hybrid electric microgrids. The proposed solution obtained, based on a heuristic method of the family of brute force or exhaustive search algorithms, is novel, seeks the optimal solution, is finite, scalable and has a low computational cost. It constitutes an innovative solution for the optimal selection of distributed generation centers and the deployment of distribution networks, specifically in the location of solar panels, diesel generators and transformers.

**Keywords:** distributed generation; optimal deployment; distribution lines; heuristic methods; electrical micro-grids.

**Recibido:** 14/09/2021  
**Aceptado:** 10/12/2021

## Introducción

El Consorcio de Soluciones Tecnológicas de Fiabilidad Eléctrica (CERTS del inglés *Consortium for Electric Reliability Technology Solutions*) de los EEUU, define una microrred como la agregación de cargas y fuentes generadoras pequeñas que operan como un sistema de calor y potencia únicos (Abella et al., 2009). Del mismo modo, los recursos de generación distribuida (DER, del inglés *Distributed Energy Resources*), son generadores de potencia pequeños, los cuales se encuentran ubicados en el mismo lugar que las personas que reciben el servicio (Ortiz et al., 2020). Asimismo, una microrred inteligente puede definirse como el sistema mediante el cual se posibilita generar, transmitir, distribuir y finalmente utilizar la energía, de manera que esta pueda ser usada limpiamente, a partir de evitar una huella negativa sobre el medio ambiente. Adicionalmente, una microrred inteligente permite intercambiar datos entre los distintos componentes del sistema.

Una de las ventajas de las microrredes inteligentes es la capacidad que tiene el usuario de mantenerse informado a través de pantallas en su vivienda. Esta red facilita el monitoreo y el control de los recursos y la operación, para poder generar energía con base en su demanda, con tiempos cortos, todo lo cual permite la optimización del sistema (Matos et al., 2019). Las redes eléctricas están compuestas por diversas tecnologías de generación, almacenamiento y de carga, siendo las redes inteligentes el nuevo paradigma en esta área de conocimiento, debido a la utilidad de la información obtenida para la toma de decisiones en la operación de las mismas con mayor eficiencia (Alba et al., 2015; Gonzalo et al., 2020). Su nivel de aplicación dependerá del volumen de demanda que se pretende satisfacer, así como ubicación óptima. La tipología de las microrredes es muy variada, pueden suministrar en corriente alterna y en continua, o en ambas al mismo tiempo. La tensión del suministro puede ser baja y media, pudiendo presentar



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional** (CC BY 4.0)

una estructura radial o en anillo. Finalmente pueden estar conectadas a la red de distribución eléctrica u operar de forma aislada.

En la investigación se abordan las microrredes como una solución optimizada y escalable en poblaciones de Guayaquil, Ecuador, que presentan características de crecimiento constante, con una demanda de energía eléctrica cada día mayor. Esta situación ha provocado constantes caídas de voltaje y pérdida de potencia en las líneas eléctricas por el desabastecimiento de energía a la red por la elevada demanda (Batista et al., 2009). Es por ello que la implementación de microrredes eléctricas constituiría una solución factible, bien sea para operar de manera conectada a la red eléctrica o en modo aislado, constituyendo otra ventaja de su implementación.

Los criterios para la ubicación del generador diésel, también llamado grupo electrógeno, son fundamentales para la selección del sitio óptimo de una microrred. Se debe seleccionar un sitio cercano a las áreas donde será aprovechada la energía eléctrica generada, lo que trae consigo el ahorro de recursos para una adecuada distribución de la corriente eléctrica. Del mismo modo, se deben considerar otros factores como la ventilación adecuada, lo que permite asegurar que el humo no se escape, lo que representa un alto peligro sobre todo en áreas de mucho viento (De Alaminos et al., 2014). En el mismo orden de discusión, dentro de los criterios técnicos para el dimensionamiento de un sistema de energía solar fotovoltaica se deben considerar las características y datos relevados de radiación solar de la zona (Roitman et al., 2015). Ello se debe a que mientras más expuesta esté la instalación fotovoltaica al sol, mayor será la energía que producirá y más rentable será el sistema fotovoltaico (Abella y Romero, 2009).

Teniendo en cuenta la necesidad de la adopción de microrredes eléctricas inteligentes, existe otro problema que a menudo entorpece su implementación, su ubicación para la selección óptima de los centros de generación distribuida y el despliegue de las redes. Esta tarea posibilita reducir gastos y costos, al mismo tiempo que potencia su usabilidad y beneficios. En tal sentido, el diseño de algoritmos para los sistemas de electrificación permite la implementación de circuitos eléctricos, por medio de la utilización de métodos heurísticos, los cuales determinan la ubicación óptima de transformadores, generadores diésel y de paneles solares. Tal tarea es posible ya que los métodos heurísticos, en su análisis exhaustivo del espacio de búsqueda, comienzan con una solución del problema identificado y la mejoran progresivamente, por medio de la determinación de máximos locales, hasta intentar encontrar un máximo global que cumpla con la función objetivo definida. Este tipo de métodos finalizan cuando, para una solución, no existe ninguna solución accesible que la mejore (Ortiz-Matos et al. 2017).

El problema identificado contempla la necesidad de llevar a cabo una distribución con equidad en pérdidas, teniendo en cuenta las limitaciones de capacidad de los dispositivos y la topología de la tierra a un costo económico



mínimo. Es por ello que en la investigación se pretende desarrollar un modelo heurístico que posibilite el despliegue óptimo de sistemas de generación distribuida, redes de distribución y la subestación para microrredes de comunidades aisladas. La electrificación se realizará en dependencia de la ubicación preestablecida de los usuarios residenciales de la microrred. Se plantea un modelo heurístico escalable que busque la ubicación y conexión óptima de los sistemas que conforman la microrred. El despliegue óptimo de los elementos que conforman la microrred aislada garantizaría la electrificación de todos los barrios a un costo mínimo de inversión, en términos de la distancia entre los conductores eléctricos, la cantidad de dispositivos de transformación mediante la búsqueda de rutas de líneas de distribución, la ubicación de transformadores y la generación distribuida.

## Materiales y métodos

El objetivo general de la investigación es desarrollar un método heurístico basado en K-medias, árbol de expansión mínima y fuerza bruta que permita desplegar de manera eficiente las redes de distribución y llevar a cabo una generación distribuida de las microrredes eléctricas híbridas CA aisladas.

La investigación tiene un diseño de investigación no experimental, con alcance descriptivo y enfoque cuantitativo. Fue desarrollada en Guayaquil, Ecuador entre los meses de abril a agosto de 2021. Los objetivos específicos definidos para dar cumplimiento al objetivo general son:

1. Diseñar un nuevo método heurístico que facilite la electrificación de microrredes eléctricas aisladas, el despliegue de generación distribuida, transformadores y líneas de distribución en dos niveles de tensión.
2. Analizar el despliegue y la ubicación propuesta por el método heurístico para los elementos de la microrred aislada mediante la búsqueda de rutas de líneas de distribución, la ubicación de los sistemas de la microrred.

Del mismo modo, las actividades de la investigación desarrolladas como parte de la metodología de trabajo son:

1. Realizar un estado del arte sobre métodos de optimización y heurísticos aplicados en la planeación óptima de Microrredes (MR).
2. Definir un método metaheurístico aplicable al problema de la electrificación de la MR, basado en K-medias, árbol de expansión mínima y fuerza bruta.
3. Diseñar el algoritmo heurístico que permita obtener una distribución con equidad en pérdidas, teniendo en cuenta las limitaciones de capacidad de los dispositivos y la topología de la tierra a un costo económico mínimo para Microrredes aisladas.



#### 4. Realizar un análisis del despliegue y la ubicación encontrada por el método heurístico propuesto.

Como parte del desarrollo del estudio se llevó a cabo un análisis documental donde se identificaron las principales investigaciones actuales relacionadas con microrredes eléctricas, métodos heurísticos, generación distribuida, líneas de distribución y despliegue óptimo. Se priorizaron las investigaciones comprendidas entre los años 2017 y 2021, publicadas en revistas científicas, indexadas en bases de datos de impacto como Scopus y Thomson Reuters, así como otras indexadas en Scielo, EBSCO, Redalyc y Latindex Catálogo 2.0. Las investigaciones consultadas posibilitaron realizar el estado del arte de la temática, así como definir los principales aspectos que determinaron la implementación favorable de un método heurístico para el despliegue óptimo de redes de distribución y generación distribuida para microrredes eléctricas híbridas CA aisladas.

## Resultados y discusión

Los resultados fundamentales de la investigación son presentados a continuación, en donde se aborda el método heurístico basado en k-medias, árbol de expansión mínima y fuerza bruta desarrollado, el cual permite desplegar de manera eficiente las redes de distribución, así como proponer una generación distribuida de las microrredes eléctricas híbridas CA aisladas. El resultado estuvo desglosado en la ejecución de las cuatro actividades de la investigación abordadas en la sección anterior. El algoritmo heurístico desarrollado realiza una búsqueda exhaustiva de soluciones factibles que constituyen máximos locales hasta intentar arribar a un máximo global. Para ello tiene en cuenta los costes asociados con los recursos materiales necesarios, la capacidad de carga y pérdidas.

Con el fin de definir una primera instancia de la solución, se utiliza el algoritmo de K-medias, en el que la agrupación de los sitios se define como casas o barrios. Esta agrupación se basa en la base de las distancias euclidianas y número de centroides. Una vez que los centroides se definen para los barrios con las características anteriores, es necesario trasladarlos a un lugar adecuado en una ubicación exacta de coordenadas, definido por los sitios candidatos, que deberá cumplir con la restricción de no tener un hogar o vecindario en ese lugar. Este movimiento se realiza a través de una búsqueda inteligente en sitios candidatos más cercanos al punto centroide haciendo una comparación entre las distancias desde el centro de gravedad de los sitios.

Una vez que se define una primera aproximación de la ubicación del centro de gravedad, ya que sería la posición de la subestación de subtransmisión de distribución, una comparación de las distancias de estos centroides se realiza en contra de los sitios de terminación de la red de transporte que son los candidatos a llevar a cabo la conexión. En este caso, estos sitios se definen con las coordenadas de cada esquina del mapa. Mediante la comparación de las



mediciones obtenidas, el algoritmo de k-medias se utiliza de nuevo para seleccionar un nuevo centroide entre el punto de conexión y los centroides definidos anteriormente. El nuevo centroide es la transmisión del transformador a subtransmisión que delimita rejillas de enrutamiento como que permitirán la adición de diversas funciones de conductor eléctrico de costes utilizados en la transmisión, subtransmisión y distribución. La posición de este centro de gravedad se trasladó a un sitio candidato bajo los mismos criterios tomados para subestaciones de subtransmisión de distribución.

Con las ubicaciones obtenidas el enrutamiento para el despliegue de la red se logra utilizando el algoritmo de Dijkstra, el cual explora cada una de las rutas declaradas en la selección de los mejores criterios de peso que se definen por su coste y distancia. El proceso consiste en encontrar la solución óptima al hacer un cambio inteligente de las posiciones asignado por la minimización de los candidatos con la reubicación dentro de la ruta factible descrito por Dijkstra como más corto para desplegar una red de aire a diferentes niveles de voltaje.

Más tarde, se logra un nuevo cálculo de los costos y la pérdida de la función objetivo, manteniendo sólo la solución que cumpla con el criterio de costo total más bajo. Así, la ruta óptima y la ubicación de los centros de procesamiento se obtiene con el fin de cumplir los criterios para la electrificación en zonas rurales.

Los algoritmos desarrollados se muestran en las Tablas 1 “Función Costo mínimo mediante Dijkstra” y Tabla 2 “Despliegue óptimo de la red”.

**Tabla 1.** Algoritmo “Función Costo mínimo mediante Dijkstra”. Fuente:(Ortiz et al., 2020).

|  |
|--|
| <p>Función: CostoMinimoDijkstra</p> <p><b>Paso 1.</b> Entrada: <math>L; P; M; CostoX iL;</math></p> <p><b>Paso 2.</b> Salida: <math>costoTL; Transformacion;</math></p> <p><b>Paso 3.</b> Inicializar: <math>noCont = P; Np(U_j) \ll \emptyset;</math></p> <p><b>Paso 4.</b> Agrupaciones = <math>K-medias(X_L; Y_L; M)</math></p> <p style="padding-left: 20px;"><b>Para</b> centroide <math>\in M_L</math></p> <p style="padding-left: 40px;"><math>P'm = argmin = \{Dck, P\};</math></p> <p style="padding-left: 40px;"><math>CostoMinCluster = inf;</math></p> <p style="padding-left: 20px;"><b>Para</b> <math>\Delta x \in \{-h, q, h\}</math></p> <p style="padding-left: 40px;"><b>Para</b> <math>\Delta y \in \{-h, q, h\}</math></p> <p><math>P'm = P_i \in P \mid x_i = X_m + \Delta x_i; y_i = y_m + \Delta y;</math></p> <p style="padding-left: 40px;"><math>Costo = \sum_{i \in Ck} h p_k, L_j</math></p> <p style="padding-left: 40px;"><b>Si</b> <math>costo &lt; CostoMinCluster</math></p> <p style="padding-left: 40px;"><math>CostoMinCluster = Costo;</math></p> <p style="padding-left: 40px;"><math>Pm = P'm;</math></p> |
|--|



```

        finSi; finPara; finPara;
        Pe = Pe U Pm;
        costoT= costoT + CostoMinCluster;
        finPara;
Paso 8. Retornar: costoTL; Transformacion

```

**Tabla 2.** Algoritmo “Despliegue óptimo de la red”. Fuente: elaboración propia.

**Función:** DespliegueOptimoRed

```

Paso 1.Entrada: L(xc, yc); M; K; P (xp, yp); CostoXuC;
        CostoXuS; cap; P; no; n; Ii; Ri;
Paso 2. Salida: Transformacion; Subestacion; PuntoSalida; CostoOperacion;
Paso 3.Inicializar: Costoi=informacion; CostoTotal=informacion; CostoCT=informacion;
        distancia =informacion; predecesor = nulo; CostoOperacion =informacion; S(xs, ys);
        Transformacion = nulo;
Pcand = [-n-1, -n, -n+1, -1, +1, n-1, n, n+1];x_g1 = input ('Coordenada x de La GD1:');
        y_g1 = input ('Coordenada y de La GD1:');x_g2 = input ('Coordenada x de La
GD2:');
        y_g2 = input ('Coordenada y de La GD2:');P = [ x_g1, y_g1; x_g2, y_g2; ];
Paso 4. [Transformacion, CostoCT] ← CostoMinimoDijkstra(L,P,M);
Paso 5.ParaTodo i ∈ {1,..., |no|}
        MSP = Transformacion U P(i);
        AgrupacionesT ← K-medias (Xmsp; Ymsp; K);
MSP = Transformacion \ P (i); Pm = argmin {Dck, P};
        ParaΔXmps ∈ {-h, q, h}
            ParaΔYmps ∈ {-h, q, h}
                P'm = Pi ∈ P | xi = Xk + Δx; yi = yk + Δy;
                Costo = ∑i ∈ Lm dpm, Lj
                Costo = Costo * CostoXuP;
                Costoi = Costo + CostoCT;
                Si Costoi < CostoCT
                    CSubestacion = AgrupacionesT;
                    PuntoSalida = P(i);
                    finSi; finPara; finPara;
            finParaTodo
V=S ∪ MSP U Subestacion;

Paso 6. ParaTodo i ∈ {1,..., |V|}
        distancia[i] = informacion; predecesor[i] = nulo;
        agregar (orden, <I, distancia [i]>); distancia[s] = 0;

```



```

Mientras orden <>0
    i = orden \ min (orden)
    Para jadyacentea i
        Si (j eorden) and (distanciaj[j] > peso (i,j))
            predecesor[j]=I; distancia[j]=peso(i,j);
            Actualizar (orden, <j, distancia[j]>)
            finSi; finPara; finMientras; finParaTodo
CostoSal = distanciatPuntoSalida * CostoXuS;
Paso 7. Para k e {1,...,|Subestacion|}
    CostoTotal= CostoCT + CostoSal;
    Si CostoTotal< CostoOperacion
        CostoOperacion = CostoTotal;Transformacion FIN = Transformacion;finSi
Para I e {1,...,|xt|}
    distanciat = distanciat + sqrt((xc(j) - c(idx(j), 1))^2 + ... + (yc(j)-c(idx(j),
2)^2));finPara
CCasa =  $\sum_{i=1}^{dist}$  dist(i,j)CostoXuC; $\Delta P = \sum_{i=1}^m l_i^2 * R_i * distanciat_i$ 
Paso 9. pmin = zeros(size(P));
Para i = 1:size(P,1)
    pmin(i,:) = hallarMinimo( P(i,:), dist_ruta2 );finSi
Para i = 1:size(P,1)
    f11= plot( P(i,1), P(i,2), '-o', 'markerfacecolor','g');
    f12= plot( [ P(i,1) pmin(i,1) ], [ P(i,2) pmin(i,2) ], '-.b' );end
function pmin = hallarMinimo(P,dist_ruta2);
Np = size(dist_ruta2,1);n = 1001;t = linspace(0,1,n)';dmin = Inf;pmin = NaN(1,2);
Para i = 2:Np
    x = t*dist_ruta2(i-1,:) + (1-t)*dist_ruta2(i,:);d = vecnorm( P - x, 2, 2 );
    [ aux, idx ] = min(d);if aux < dmin
        dmin = aux;pmin = x(idx,:);end

```

A continuación, en las figuras 1, 2 y 3 se muestra el despliegue óptimo realizado para redes de distribución y generación distribuida para microrredes eléctricas híbridas CA aisladas. En tales imágenes se especifica la electrificación realizada a 20, 15 y 20 casas respectivamente. Para una mejor comprensión de los planos diseñados, en la leyenda se sitúan los sitios candidatos, las cargas lineales y no lineales, los dos grupos de transformadores por tipo de voltaje, la ubicación de la red principal, así como el posicionamiento de la generación distribución. Del mismo modo, se visualizan las líneas de acometidas, las líneas de distribución, las líneas de subtransmisión y las líneas de conexión de la generación distribuida. Cada uno de esos componentes garantizan el despliegue óptimo de las redes de distribución y generación distribuida en comunidades de Guayaquil, Ecuador con un crecimiento constante.





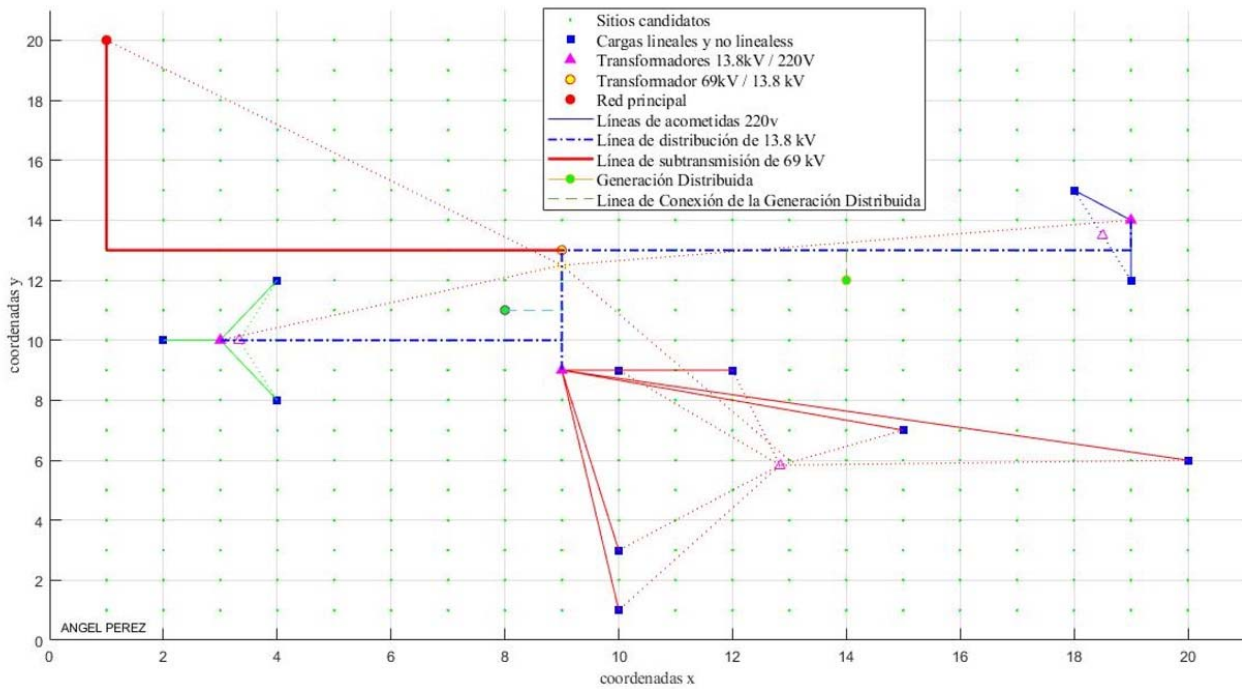


Figura 1. Despliegue óptimo de las microrredes eléctricas híbridas CA aisladas para 20 casas. Fuente: elaboración propia.



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo *Atribución 4.0 Internacional* (CC BY 4.0)

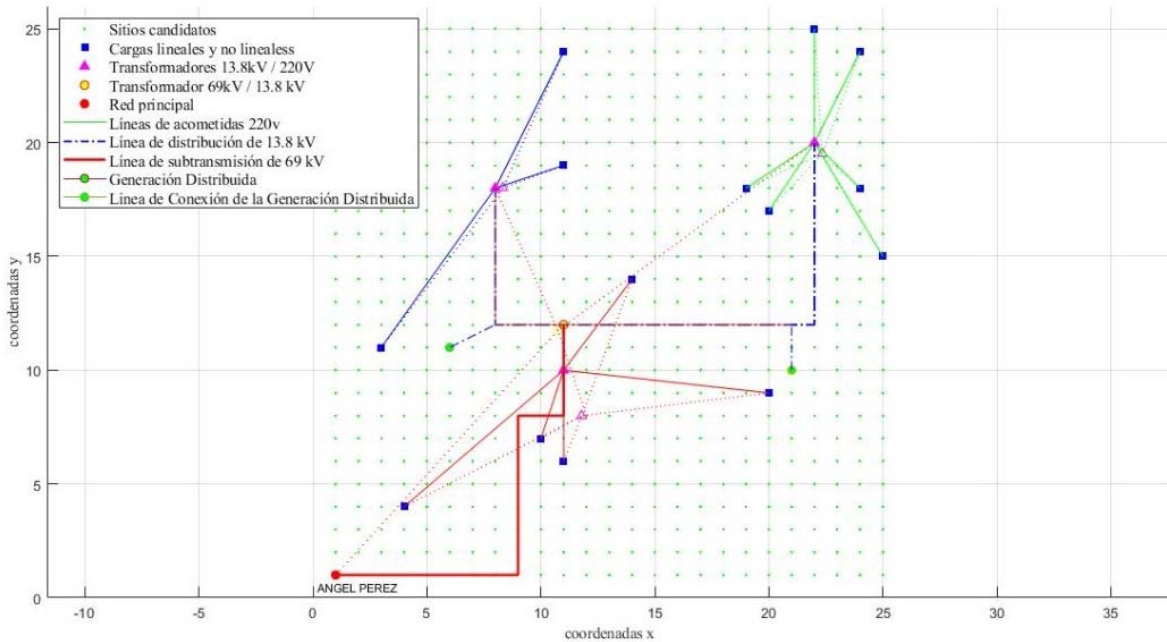


Figura 2.Despliegue óptimo de las microrredes eléctricas híbridas CA aisladas para 15 casas. Fuente: elaboración propia.

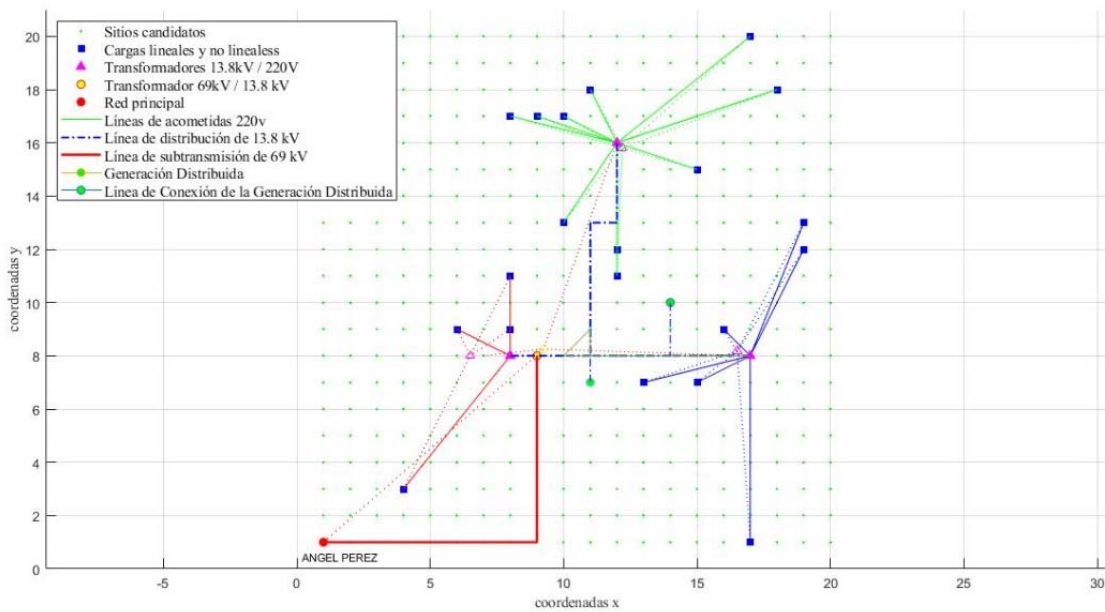


Figura 3.Despliegue óptimo de las microrredes eléctricas híbridas CA aisladas para 20 casas. Fuente: elaboración propia.



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo *Atribución 4.0 Internacional* (CC BY 4.0)

Diversas son las investigaciones que en la actualidad abordan el empleo de microrredes eléctricas (Caro, 2017; García y Ordóñez, 2017). De acuerdo con Ebrahimi et al. (2020) y Ortiz et al. (2020), las microrredes son consideradas como una solución óptima para el suministro efectivo de energía y un esquema sustentable en el despliegue de redes eléctricas. Para su implementación, juegan un papel fundamental los problemas de accesibilidad, localidad o ubicación geográfica, adecuada distribución, correcta generación, uso eficiente de los recursos y progresivo crecimiento de las propias redes eléctricas, por lo que constituye un fenómeno de análisis multifactorial.

En la investigación realizada por Caro (2017), el autor afirma que las microrredes constituyen una propuesta sostenible para poder electrificar, con recursos renovables, localidades rurales o de difícil acceso. No obstante, para ello se debe tener en cuenta la incertidumbre de factores críticos como la demanda eléctrica o las fuentes renovables de energía con las que se cuenta. Para los autores, los elementos anteriores determinan el correcto diseño del sistema. Es por ello que en su estudio proponen un método que integra análisis difusos y de intervalo mediante covarianzas, para la obtención de resultados más precisos. Como conclusiones del estudio, el diseño final de la microrred se compone fundamentalmente de energía solar y eólica, por medio de tecnología fotovoltaica.

A tales resultados, como los evidenciados anteriormente, arriban los autores de la presente investigación, así como Guacaneme et al. (2014), Mina et al. (2017) y Ponce (2018), quienes para lograr la generación distribuida de energía utilizan tecnología fotovoltaica por su sostenibilidad, costo de adquisición y ventajas de operación, independientemente de los modelos matemáticos que utilizan en su diseño y para la obtención y análisis de los datos obtenidos. En sus análisis evidencian igualmente las ventajas de la utilización de microrredes, como ya se han abordado. Asimismo, plantean la existencia de desventajas de su utilización, entre las que se enuncian: la elevada complejidad y la alta tasa de fallas e incertidumbre, producto del número de factores que se deben tener en cuenta para lograr redes de distribución óptimas, generación distribuida eficiente y operatividad de la microrred en sentido general (Ortiz et al., 2020).

Es por ello que, si bien la utilización de microrredes presenta un conjunto de ventajas, de su empleo emanan un conjunto de desafíos. En este sentido, diversos investigadores como Carrión et al. (2017), Cisneros (2018) y Loyarte et al. (2018) han sugerido la utilización de métodos de optimización, entre los que se encuentran los métodos heurísticos, para aplicarlos en la planeación óptima de microrredes eléctricas. Uno de los problemas que los investigadores plantean en su justificación, y con la cual el autor de la presente investigación coincide, es que el continuo crecimiento de las localidades impacta igualmente en el crecimiento de las redes eléctricas. Sin embargo, dicha expansión no puede afectar la correcta disposición de las redes de distribución, ni atentar contra la generación



distribuida de electricidad. Para ello, actualmente se utilizan métodos de optimización heurística para la planeación óptima de microrredes eléctricas (Carcelán, 2018; Cisneros, 2018).

Los métodos heurísticos son técnicas de optimización matemática e informática, los cuales permiten resolver un problema de forma más rápida que los algoritmos clásicos. Seleccionan en cada paso local la opción óptima, con el propósito de alcanzar a una solución global óptima (Pérez, 2016). En el contexto de la investigación, y como refiere Carcelán (2018), los métodos heurísticos favorecen la escalabilidad que presupone la variabilidad de la densidad poblacional en el despliegue de las microrredes eléctricas. Asimismo, son robustos en la reducción de los costos por empleo de recursos requeridos, a partir de la optimización del enrutamiento por mínimo costo en el diseño de las microrredes, siendo computacionalmente eficiente. Como resultado de su trabajo, los autores obtienen un modelo planeación, el cual permite la disminución de los tiempos de despliegues de nuevas redes y la optimización en el despliegue de redes de electrificación soterradas.

Por otro lado, en la investigación realizada por Carrión et al. (2017) se emplea una heurística, por medio del algoritmo k-mean, para establecer las ubicaciones óptimas de cada uno de los elementos que constituyen la microrred eléctrica. Los autores parten de la problemática que constituye el empleo eficiente de los recursos, en este caso la ubicación de transformadores de distribución para un determinado número de usuarios, en una zona geográfica específica, en donde se considera la minimización de los costos de conectividad hacia una subestación eléctrica y la capacidad de los transformadores.

En todas las investigaciones analizadas se emplean algoritmos de optimización heurística debido a que soluciona de manera eficiente el problema identificado, en detrimento de otros algoritmos más complejos que pudieran ser utilizados pero que implicarían un mayor costo y complejidad computacional en su implementación. Sus ventajas son conocidas, abordadas en las investigaciones citadas y discutidas. En cambio, sus limitaciones son específicas del área de aplicación, así como de las variables o factores tenidos en cuenta para la implementación. Asimismo, sus desventajas se asocian esencialmente con que los algoritmos heurísticos siempre encontrarán un óptimo, aunque no se asegura que la solución dada siempre sea un óptimo global.

## Conclusiones

Se desarrolló un método heurístico basado en K-medias, árbol de expansión mínima y fuerza bruta que permita el despliegue óptimo de redes de distribución y generación distribuida para microrredes eléctricas híbridas CA aisladas. La propuesta de solución obtenida, basada en un método heurístico de la familia de los algoritmos de



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional** (CC BY 4.0)

fuerza bruta o búsqueda exhaustiva, es novedosa, óptima, finita, escalable y de bajo costo computacional. La misma constituye una solución innovadora para la selección óptima de los centros de generación distribuida y el despliegue de las redes de distribución, específicamente en la ubicación de paneles solares, generadores diésel y transformadores. Además, se presenta como un sistema de control centralizado y como una excelente alternativa tecnológica para el desarrollo de redes inteligentes, eficientes y seguras, en el cual todos los elementos pueden ser monitorizados desde un computador, lo cual le permite al usuario ejercer las acciones de control de forma remota, en función de las condiciones deseadas en cada momento en el sistema.

Las principales limitaciones del estudio se corresponden a los limitados recursos empleados y al alcance espacio-temporal, los cuales no permitieron profundizar en la experimentación en cuanto al despliegue óptimo de la propuesta de solución y su efecto en las comunidades a donde se dirige este trabajo. Sin embargo, los autores consideran que la investigación puede ser utilizada como referente teórico y práctico en el tratamiento de la materia, a partir del análisis bibliográfico realizado empleando los términos microrredes eléctricas, métodos heurísticos, generación distribuida, líneas de distribución y despliegue óptimo, así como por la propuesta de solución presentada y su posterior discusión.

Los trabajos futuros relacionados con el despliegue óptimo de redes de distribución y generación distribuida para microrredes eléctricas híbridas CA aisladas deben centrarse en la investigación de nuevos algoritmos con un costo computacional más bajo, que generen resultados óptimos globales en el menor tiempo posible, que sean escalables y finitos, de manera que posibiliten dar una solución factible al problema identificado. Del mismo modo, deben analizar la sustentabilidad futura de las microrredes eléctricas inteligentes, a partir de la integración de las fuentes de energías renovables y el esfuerzo conjunto de las comunidades. Su adopción posibilitaría además la reducción de costos, agilizaría la construcción de infraestructura de generación y transmisión, minimizaría la emisión de gases contaminantes a la atmósfera, habría un menor consumo de combustibles y contaminación, y la extensión de terreno ocupado sería mínimo. Del mismo modo constituyen trabajos futuros la implementación de algoritmos de georreferenciación que por medio de imágenes permitan la identificación y localización automática de áreas candidatas para el despliegue óptimo de redes de distribución y generación distribuida.

## Conflictos de intereses

No existe conflicto de intereses.



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional** (CC BY 4.0)

## Contribución de los autores

1. Conceptualización: Ángel Josué Pérez Pazmiño, Leony Ortiz Matos
2. Curación de datos: Ángel Josué Pérez Pazmiño, Leony Ortiz Matos
3. Análisis formal: Ángel Josué Pérez Pazmiño y Leony Ortiz Matos
4. Adquisición de fondos: Ángel Josué Pérez Pazmiño y Leony Ortiz Matos
5. Investigación: Ángel Josué Pérez Pazmiño y Leony Ortiz Matos
6. Metodología: Ángel Josué Pérez Pazmiño y Leony Ortiz Matos
7. Administración del proyecto: Leony Ortiz Matos
8. Recursos: Ángel Josué Pérez Pazmiño y Leony Ortiz Matos
9. Software: Ángel Josué Pérez Pazmiño y Leony Ortiz Matos
10. Supervisión: Leony Ortiz Matos
11. Validación: Ángel Josué Pérez Pazmiño, Leony Ortiz Matos
12. Visualización: Ángel Josué Pérez Pazmiño y Leony Ortiz Matos
13. Redacción – borrador original: Ángel Josué Pérez Pazmiño
14. Redacción – revisión y edición: Ángel Josué Pérez Pazmiño y Leony Ortiz Matos

## Financiamiento

La investigación no requirió fuente de financiamiento externa.

## Referencias

- ABELLA, M. A., ROMERO, F. C. Sistemas de bombeo fotovoltaico. Master en Energías Renovables y Mercado Energético. *Dimens. Sist. Fotovoltaicos*. 2009, 1(1). Disponible en <https://static.eoi.es/savia/documents/componente45332.pdf>
- ALBA, C. B., GARCÍA-TORRES, F., ISORNA, L. V. Gestión Óptima de la Energía en Microrredes con Generación Renovable. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. 2015, 12 (2), 117-132. Disponible en <https://riunet.upv.es/handle/10251/143755>



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional** (CC BY 4.0)

- BATISTA, E. R. H., CARDONA, B. R., RODRÍGUEZ, C. B. El Diagnóstico técnico por análisis de eficiencia, técnica para evaluar el estado de condición de un equipo. Aplicación a un grupo electrógeno. *Ciencias Holguín*.2009, 15(2), 1-10. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/1815/181517990002.pdf>
- CARCELÁN, E. G. S. Despliegue óptimo de redes de distribución eléctricas soterradas usando métodos metaheurísticos y simulación. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador. 2018. Disponible en <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15076>
- CARO, R. A. M. Planificación de microrredes para comunidades rurales con caracterización de incertidumbre de los recursos renovables y demanda eléctrica. Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Eléctrica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 2017. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/144288>
- CARRIÓN, D., GARCÍA, E., GONZÁLEZ, J. W., ISAAC, I. A., LÓPEZ, G. J., HINCAPIÉ, R. Método heurístico de ubicación óptima de Centros de Transformación y Enrutamiento de Redes Eléctricas de Distribución. *Revista Técnica "energía"*. 2017, 13(1), 90-96, 2017. Disponible en <http://revistaenergia.cenace.org.ec/index.php/cenace/article/view/11/10>
- CISNEROS, E. B. H. Planeación óptima de redes de distribución eléctrica aérea usando métodos heurísticos y procesos de simulación. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador. 2018. Disponible en <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16553>
- DE ALAMINOS, J., ALCOR, E., ASENSIO, M., BERNADÓ, R., FERNÁNDEZ, L., GÓMEZ, E., PEIRÓ, J. Estudio sobre las microrredes y su aplicación a proyectos de electrificación de zonas rurales. *Energía sin Fronteras*.2014.
- EBRAHIMI, J., NIKNAM, T., BAHMANIFIROUZI, B. Energy scheduling in a Hybrid DC/AC Micro-Grid Considering Battery/Wind/Photovoltaic Power Sources using Heuristic Optimization Algorithm. *Majlesi Journal of Electrical Engineering*. 2020, 14(3), 101-110. Disponible en <https://doi.org/10.29252/mjee.14.3.13>
- GARCÍA, R., ORDÓÑEZ, G. Retos de la planificación energética de microrredes en regiones rurales remotas con cargas dispersas. En IX Simposio Internacional sobre Calidad de la Energía Eléctrica. Bucaramanga, Colombia, 2017. Disponible en <https://revistas.unal.edu.co/index.php/SICEL/article/view/63668>



- GONZALO, G., AGUILA, A., GONZÁLEZ, D., ORTIZ, L. Optimum location and sizing of capacitor banks using VOLT VAR compensation in micro-grids. *IEEE Latin America Transactions*. 2020, 18(03), 465-472. Disponible en <https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9082717>
- GUACANEME, J. A., VELASCO, D., TRUJILLO, C. L. Revisión de las características de sistemas de almacenamiento de energía para aplicaciones en micro redes. *Información tecnológica*. 2014, 25(2), 175-188. Disponible en <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642014000200020>
- LOYARTE, A. S., CLEMENTI, L., VEGA, J. Estrategias para la implementación de algoritmos PSO en problemas de planificación y gestión óptima de microrredes. Repositorio Institucional Abierto, Facultad Regional Santa Fe, Argentina. 2018. Disponible en <https://ria.utn.edu.ar/handle/20.500.12272/3211>
- MATOS, L. O., GUTIÉRREZ, L. B., SÁNCHEZ, J. W., TÉLLEZ, A. A. An ARX-petri nets algorithm for active identification of an AC/DC microgrid simulation. In *2019 IEEE 4th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*. 2019. (pp. 1-6). IEEE. Disponible en <https://doi.org/10.1109/CCAC.2019.8921191>
- MINA, J. D., CAICEDO, E. F., LOZANO, C. A. A proposal of integration of decentralized generation architectures in microgrid environments. *Entre Ciencia e Ingeniería*. 2017, 11(22), 9. Disponible en [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-83672017000200009](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-83672017000200009)
- ORTIZ-MATOS, L., AGUILA-TELLEZ, A., HINCAPIÉ-REYES, R. C., GONZÁLEZ-SANCHEZ, J. W. Multi-criteria optimization of the deployment of a grid for rural electrification based on a heuristic method. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. (Vol. 73, No. 1, p. 012020). IOP Publishing. Disponible en <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/73/1/012020/meta>
- ORTIZ, L., GONZÁLEZ, J. W., GUTIERREZ, L. B., LLANES-SANTIAGO, O. A review on control and fault-tolerant control systems of AC/DC microgrids. *Heliyon*. 2020, 6(8), e04799. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04799>
- ORTIZ, L., GUTIÉRREZ, L. B., GONZÁLEZ, J. W., ÁGUILA, A. A novel strategy for dynamic identification in AC/DC microgrids based on ARX and Petri Nets. *Heliyon*. 2020, 6(3), e03559. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03559>
- PÉREZ, J. F. R. Modelo para la selección de equipos de trabajo quirúrgico en sistemas de información en salud aplicando técnicas de inteligencia organizacional. Tesis de Doctorado. Universidad de las Ciencias Informáticas, La Habana, Cuba. 2016. Disponible en <https://repositorio.uci.cu/handle/123456789/7161>





PONCE, F. J. P. Despliegue óptimo de redes de distribución con generación distribuida usando fuentes de energía fotovoltaica. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador. 2018. Disponible en <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16551>

ROITMAN, M., MESTRALLET, A., ARAMBURU, M., ROSSI, R. Dimensionamiento de un sistema de energía solar fotovoltaica para una vivienda familiar de la Ciudad de Córdoba. *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. 2015, 2(2), 37-43. Disponible en <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFYN/article/download/10884/12668/32511>



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional** (CC BY 4.0)