

Posicionamiento óptimo de cuadrillas de mantenimiento usando información de Cloud de Google Maps e indicadores de confiabilidad

Tomás Valencia - Diego Rodríguez
Carrera 13A # 98-21. Oficina 501

E.mail: tvalencia@gersusa.com/diego.rodriguez@gers.com.co - GERS
Bogotá, D.C. – Colombia

Abstract: Con el fin de mejorar los valores de SAIDI en las redes de distribución, este documento muestra una herramienta novedosa para el posicionamiento óptimo de recursos de mantenimiento. La herramienta integra información almacenada en Cloud de Google mediante información de tránsito capturada a través de la plataforma de Google Maps y utiliza algoritmos de optimización para definir la mejor posición de las cuadrillas de mantenimiento. Los resultados obtenidos revelan una gran aplicación en redes urbanas y rurales e integra una propuesta innovadora para la integración de tecnologías IoT al área de las redes de distribución.

I. INTRODUCCIÓN

A mediados de los años 50, la electricidad tomó un papel relevante en la ejecución de trabajos a nivel industrial y una parte activa en la vida diaria de muchos de los hogares existentes. Debido a esta alta dependencia, la continuidad del servicio de electricidad se ha convertido, desde entonces, en uno de los factores determinantes para aumentar la calidad de vida en un territorio definido y promover el desarrollo industrial en una región. En [1] se define el término confiabilidad como la habilidad de un sistema o elemento, de ejecutar la función para la que está diseñado durante su vida útil. En el caso particular de las redes de distribución, se le denomina confiabilidad a la habilidad que se tiene de mantener la alimentación ininterrumpida de carga a través de la red de distribución. Para tal fin, se definieron indicadores con base en la frecuencia de interrupción (SAIFI) y la duración de las

mismas (SAIDI)[2]. En el caso colombiano, la frecuencia de interrupción oscila alrededor de 49.4 veces y 38 horas al año [3], valores que difieren significativamente de las magnitudes encontradas en países como EE.UU. y algunos de la Unión Europea. Por ejemplo, el tiempo de restablecimiento en países desarrollados se encuentra en 40 minutos [4], mientras que el de Colombia va de los 46 a las 1.5 horas [3]. Para reducir estas altas diferencias, la CREG modificó el sistema de incentivos de calidad del servicio para la actividad de distribución. En 2018, mediante la resolución CREG 015 se resolvió incluir como indicadores oficiales el SAIDI y SAIFI [5], de tal forma que se cambiaba de un modelo basado en (ENS) Energía No Suministrada a uno basado en la calidad del producto. De acuerdo con la nueva estructura de evaluación de la calidad se incluyeron metas anuales a los operadores de red con el fin de reducir los valores de SAIDI y SAIFI en el país. De esta forma, si los resultados finales de los indicadores son inferiores a las metas planteadas, el (OR) operador de red recibe un incentivo positivo representado en mayores ingresos; si por el contrario el OR, supera los valores máximos permitidos, recibirá un incentivo negativo, reflejado en reducción de sus ingresos.

Con el fin de evitar disminuciones en sus ingresos, las compañías de distribución han planteado diversas estrategias para reducir las frecuencias y tiempos de interrupción. Entre las

soluciones tradicionales que se han observado, se encuentran[6][7]:

- Uso de elementos localizadores de falla
- Uso de reconectores
- Aumento en el número de cuadrillas
- Construcción de nuevos alimentadores
- Aumento de subestaciones
- Localización de fuentes distribuidas

Aunque estas propuestas reflejan resultados exitosos, requieren en su mayoría de un nivel significativo de inversiones y posteriormente de mantenimiento. Este documento muestra una herramienta novedosa de fácil implementación y bajo costo que permite reducir en una alta proporción los tiempos de indisponibilidad del servicio de energía. Esto se logra mediante el uso óptimo de los recursos de mantenimiento existentes, sin requerir de inversiones o aumento de costos de mantenimiento. El documento está estructurado de la siguiente forma: La sección II realiza una descripción de los tipos de falla encontradas en las redes de distribución; la sección III muestra una breve descripción de la arquitectura de información en Cloud y su uso a través de plataformas como Google Maps para almacenamiento y consulta de grandes volúmenes de datos; la sección IV realiza una descripción del planteamiento del problema; la sección V muestra la estructura del problema integrando información en Cloud y los algoritmos de solución; la sección VI describe los sistemas de prueba utilizados para la prueba de los algoritmos; la sección VII muestra los resultados de los dos sistemas, cuando se suponen salidas desde un punto central y no desde distintos puntos en la región; por último, la sección VIII muestra las conclusiones.

II. INDICADORES, TIPOS DE FALLAS Y CONFIABILIDAD

Para definir la mejor estrategia que permita la reducción del tiempo de indisponibilidad, junto

con la frecuencia de interrupción, se revisarán algunos factores relevantes: los indicadores requeridos para evaluar las diversas estrategias, la naturaleza de las fallas y las variables principales que permiten mejorar los mismos.

Indicadores de confiabilidad

Con el fin de reducir los tiempos y la frecuencia de interrupción que experimentan los usuarios, en el estándar IEEE 1366 se propusieron algunos indicadores que evaluaban razonablemente la calidad percibida en una compañía distribuidora de energía. El estándar propone como relevantes [2]: SAIDI, SAIFI, CTAIDI, CAIFI, ASAI, CELID, entre otros. En particular, se ha optado por utilizar los dos primeros para comparar a nivel mundial el estado del servicio ofrecido. El SAIDI refleja el tiempo total promedio de interrupciones del servicio de energía que un cliente sufrió; de otro lado, el SAIFI representa la frecuencia con la que un cliente fue sujeto a interrupciones. Ambos indicadores son evaluados durante un período específico de tiempo, que normalmente es un año. Cuanto menor sea el valor de estas dos variables, mayor será la calidad del servicio ofrecida por una compañía distribuidora. Las ecuaciones (1) – (2) muestran la manera como estos indicadores son obtenidos.

$$SAIDI = \frac{\sum \text{Total de min. de c. interrumpidos}}{\text{Total de clientes}} \quad (1)$$

$$SAIFI = \frac{\sum \text{Número de c. interrumpidos}}{\text{Total de clientes}} \quad (2)$$

El indicador SAIFI es gestionado con inversiones que evitan la desconexión de los usuarios. Aparecen estrategias como la construcción de alimentadores doble circuito o redes enmalladas que mantienen el suministro constante de carga mediante diversas configuraciones que pueden soportar la presencia de fallas en el sistema. Además, para evitar las desconexiones temporales, se sugiere

el aumento de las campañas de podas en corredores con alta densidad de vegetación [8][9]. Sin embargo, esta última estrategia ha ido siendo sustituida por el traslado de individuos arbóreos.

Por otro lado, con el fin de mejorar el SAIDI, normalmente se ejecutan inversiones con altos costos, tales como la creación de nuevos circuitos, inclusión de equipos de corte y reconexión que permitan transferir carga entre alimentadores, seccionamiento de alimentadores, creación de nuevas subestaciones. Es también común observar soluciones de rápida implementación, como aumento de cuadrillas de mantenimiento y de respuesta inmediata. Sin embargo, este mismo tipo de recursos aumenta los costos operacionales de las empresas, reduciendo así su preferencia. Sólo se ha dado como viable bajo condiciones específicas, como decisiones estratégicas de la organización [10].

Tipos de falla

Existen principalmente dos tipos de fallas en el sistema que afectan los indicadores de la sección anterior: fallas temporales y fallas sostenidas. Las fallas temporales resultan de contactos indeseados entre objetos o animales en condiciones adversas como fuertes vientos o lluvias. Estos contactos momentáneos generan fallas que son solucionadas mediante la desconexión y reconexión de la línea algunos minutos después, con el fin de eliminar el contacto creado en el sistema [11]. Por otro lado, las fallas permanentes no pueden ser gestionadas rápidamente por la desconexión y conexión de elementos, sino que requieren de la intervención de un operario para la solución del evento. En este tipo de fenómeno se puede ubicar la quema de transformadores, rupturas de infraestructura como postes y redes, daños de dispositivos de protección, etc. Estos eventos son solucionados por la visita de personal calificado que debe revisar, reparar o en su

defecto sustituir el equipo que sufrió alguna avería.

Tiempos de restauración o reposición en fallas permanentes.

Ya que las fallas permanentes requieren de un tiempo considerable para su gestión, es relevante estudiar las partes que componen dicho tiempo. El tiempo total de atención está compuesto de tres principales: a) Tiempo de identificación b) Tiempo de desplazamiento de la cuadrilla c) Tiempo de reparación. La Figura 1 muestra los rangos de tiempo esperados para las distintas etapas.

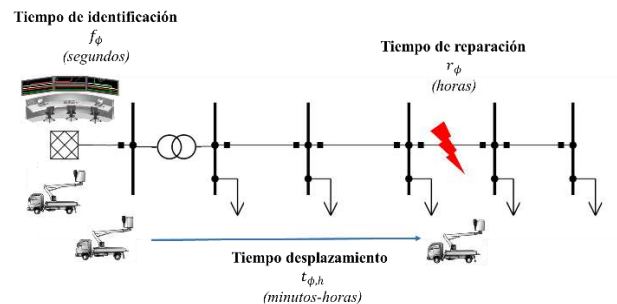


Figura 1 Composición del tiempo de atención de eventos.

El *tiempo de identificación* (f_ϕ) normalmente está ligado al número de elementos identificadores de falla o de algoritmos de identificación [12][13]. Cuando la cantidad de elementos identificadores de falla se incrementa en el sistema, la dimensión de las secciones en las que se puede encontrar la falla se reduce y de esta misma manera, el tiempo para conocer con certeza la ubicación de la falla. Aunque este parámetro es relevante para localizar apropiadamente los equipos de censo de falla, no se considerará en la definición del posicionamiento óptimo de personal de mantenimiento.

El *tiempo de reparación* (r_ϕ) está relacionado con el tipo de activo que ha sufrido la afectación, junto con el tipo de falla que se hizo presente. Por ejemplo, el número de horas requerido para la sustitución de un CT que

explotó en una subestación es alrededor de 10 horas, cuando existen sustitutos almacenados; en otro caso, la reparación de una línea que ha sido afectada por una tormenta o fuertes vientos, puede requerir entre 3-5 horas para su reparación. Aunque estos tiempos son difícilmente gestionables por optimización de recursos, han sido reducidos por medio de técnicas de gestión de activos, que permiten reducir la tasa de falla y el riesgo ante condiciones adversas, de tal forma que los activos son sustituidos o sometidos a un mantenimiento mayor, antes de su falla.

El *tiempo de desplazamiento* ($t_{\phi,h}$) es un factor determinante en redes con un número bajo de dispositivos telegestionados. El tiempo empleado en esta actividad depende de diversas variables: ruralidad de la zona, medio de transporte, el horario en el que se realiza el desplazamiento, las condiciones atmosféricas y las obras civiles que se estén realizando.

En una zona urbana como Bogotá, trasladarse un tramo de 5 km puede requerir de 1 hora en el centro-oriente de la ciudad a las 18:00. Una distancia similar puede ser recorrida en el nororiente de la ciudad en la mitad del tiempo mencionado, en la misma franja horaria. Por otro lado, el tiempo empleado por un vehículo, sin superar la velocidad reglamentaria, para recorrer la misma distancia es del 30 % (20 min) la empleada en horas pico [14]. Esto revela que el tiempo en zonas urbanas depende en gran magnitud de la hora y día en que se realiza el desplazamiento.

En el caso de zonas rurales, el desplazamiento de un técnico en un vehículo motorizado puede tomar hasta 2 horas en condiciones atmosféricas normales. Sin embargo, este valor puede ser duplicado en épocas de invierno y en algunos casos extremos, el desplazamiento puede llegar a ser imposible [15]. A su vez, estos tiempos pueden ser incrementados cuando las condiciones del terreno no permiten el acceso

de vehículos. En estas condiciones el técnico o ingeniero debe recorrer la distancia restante caminando. En estas zonas rurales, se observa que los tiempos de traslado se mantienen constantes a lo largo del día, diferenciándose notoriamente en condiciones de día y noche, o de clima lluvioso y soleado.

Estas estadísticas de desplazamiento son normalmente adquiridas por medio de un control minucioso de reporte en tiempo de salida y llegada a través de dispositivos móviles con plataformas de recolección de información desarrolladas *in-house* o por medio de un promotor de software. Sin embargo, estas soluciones involucran un alto número de recursos, hardware para trazar posibles rutas, calcular tiempos estimados, algoritmos de validación de información, técnicos y/o tecnólogos para hacer seguimiento a los indicadores capturados, etc. Con el fin de evitar el costo de toda esta infraestructura de análisis de datos, este documento plantea el uso de una plataforma como Google Maps, que almacena información de los diversos dispositivos que hacen uso de esta aplicación.

III. ARQUITECTURA DE INFORMACIÓN EN CLOUD EN REDES ELÉCTRICAS FUTURAS

Uno de los factores más relevantes en la industria actual es el incremento de datos recolectados a través de diferentes elementos en todo tipo de contextos. En el caso de la industria de transmisión y distribución de energía eléctrica, existen dispositivos que constantemente envían mediciones de variables eléctricas que permiten identificar el estado del sistema, de consumos de los usuarios, de potencia generada por generadores distribuidos a lo largo de la red, etc. [16]. Esto exige plataformas flexibles para el envío y uso de información. En [17] se plantea el uso de una estructura *internet-scale* que permita interoperabilidad entre equipos, fácil

implementación, gestión de información distribuida y procesamiento en paralelo. Esta estructura es similar a la usada por aplicaciones Web como Google Maps [18], que permiten la integración de señales de múltiples usuarios provenientes de smartphones a través de una plataforma de bajo costo¹ para el almacenamiento y tratamiento de información.

Google Maps extrae información de las señales enviadas de múltiples usuarios, validada y usada por los motores de cálculo para emitir los valores apropiados de tiempos esperados de desplazamiento entre dos puntos, distancias más cortas y lista de indicaciones para traslados entre dos o más ubicaciones. Todos los datos anteriormente mencionados son almacenados en servidores que pueden ser consultados posteriormente. Para las consultas off-line se pueden usar dos tipos de aplicaciones [14]:

A. Google Maps Distance Matrix API

Esta herramienta permite calcular las distancias a transitar y los tiempos de desplazamiento de las rutas óptimas para desplazarse (automóvil, transporte público, caminando, cicle, avión) entre dos puntos cardinales o dos direcciones. Una de las mayores ventajas de esta herramienta es que permite realizar múltiples consultas que pueden ser almacenadas en una matriz.

B. Google Maps Directions API

Esta herramienta proporciona indicaciones a seguir para desplazarse entre dos puntos. Se pueden definir tiempo de salida, llegada y medio de transporte usando el servicio *Distance Matrix API*.

Los dos servicios permiten un máximo de consultas gratuitas diarias [19]. Una vez se superan dichos umbrales, se requiere de un pago por paquetes definidos de consultas, lo que

sugiere que la efectividad en las consultas es un parámetro esencial para reducir costos y tiempos en la búsqueda de las localizaciones óptimas de las cuadrillas.

Ya que Google Maps reúne las características de flexibilidad y bajo costo que se buscan en una herramienta como la que aquí se presenta, se usa como la plataforma proveedora de información en esta solución.

IV. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y ESTRATEGIA DE SOLUCIÓN

Esta propuesta se centra en la reducción del tiempo promedio de interrupción evidenciado por cada usuario. Como se mostró en la sección II y se describe en (3), se observa que los factores relevantes son: el tiempo de interrupción $u_{\phi,h}$ causado por el evento y el número n_{ϕ} de usuarios afectados por el mismo.

$$SAIDI = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^{24} \sum_{\phi \in \Phi} n_{\phi} \mu_{\phi} u_{\phi,h} \quad (3)$$

- N número de usuarios en el sistema,
- $h \in \{1, 2, \dots, 24\}$ es cada hora del día,
- n_{ϕ} es el número de usuarios desconectados por la ocurrencia de la falla ϕ ,
- μ_{ϕ} es el número de veces que se espera que la falla ϕ ocurra durante la hora h (relacionado con la probabilidad de ocurrencia),
- $u_{\phi,h}$ es el tiempo de interrupción causado por la ocurrencia de la falla ϕ durante la hora h .
- Φ Es el conjunto de fallas que pueden suceder durante una hora.

De acuerdo con lo anterior, el tiempo de interrupción resulta del tiempo acumulado del

¹ En algunas condiciones gratuita dependiendo del número de consultas.

tiempo de identificación (f_ϕ), tiempo de transporte de la cuadrilla más cercana al punto de falla ($t_{\phi,h}$), y el tiempo de reparación (r_ϕ) como se muestra en (4)

$$SAIDI = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^{24} \sum_{\phi \in \Phi} n_\phi \mu_\phi (f_\phi + r_\phi + t_{\phi,h}) \quad (4)$$

Si se asume que cada falla es atendida por el vehículo con el menor tiempo de desplazamiento hasta el punto en el que se ha ubicado en falla, el tiempo de desplazamiento $t_{\phi,h}$ se puede expresar como en (5).

$$t_{\phi,h} = \min_{c \in C} d_{c,\phi,h} \quad (5)$$

Siendo

- c índice que identifica cada cuadrilla
- C Conjunto de todas las cuadrillas,
- $d_{c,\phi,h}$ Tiempo de desplazamiento de la cuadrilla c hasta la falla ϕ durante la hora h .

De acuerdo con esto y a lo mencionado en secciones anteriores, la cuadrilla que más rápido asistirá al punto en falla no es necesariamente la que se encuentre geográficamente más cerca, sino aquella que encuentre la ruta más efectiva para alcanzar el objetivo en el menor tiempo posible. En la búsqueda de esta ruta, se evalúan las condiciones de tráfico y las alternativas disponibles para lograr los desplazamientos más efectivos.

La propuesta que se presenta en este documento es entonces hallar la ubicación de las cuadrillas que permita minimizar el valor esperado del indicador SAIDI. Del desarrollo anterior se puede observar que sólo el tiempo de desplazamiento $t_{\phi,h}$ depende de la ubicación de las cuadrillas, por lo que los términos f_ϕ y r_ϕ salen del planteamiento de optimización. Además, se simplifica el problema tomando datos promedio de todo el año, abandonando así

la resolución horaria. De acuerdo con lo anterior, (4) y (5) son reducidas al problema de optimización que se describe en (6)

$$\min_{x_c} SAIDI_t = \min_{x_c} (\sum_{\phi \in \Phi} n_\phi \mu_\phi t_\phi) \quad (6)$$

Siendo

- x_c Vector posición inicial de todas las cuadrillas en C .

V. ALGORITMO Y ESTRATEGIA DE SOLUCIÓN

Con el fin de solucionar el problema planteado identificando los tiempos requeridos para responder a fallas localizadas en diferentes puntos, se implementa el algoritmo mostrado en la Figura 2. En primera instancia se seleccionan posiciones aleatorias iniciales. Una vez se seleccionan las posiciones iniciales, se calculan los tiempos para cubrir cada uno de los eventos existentes. Se crean nuevas poblaciones y se evalúan nuevas posiciones con el fin de reducir el tiempo promedio de atención de las fallas y el $SAIDI_t$ bajo estudio.

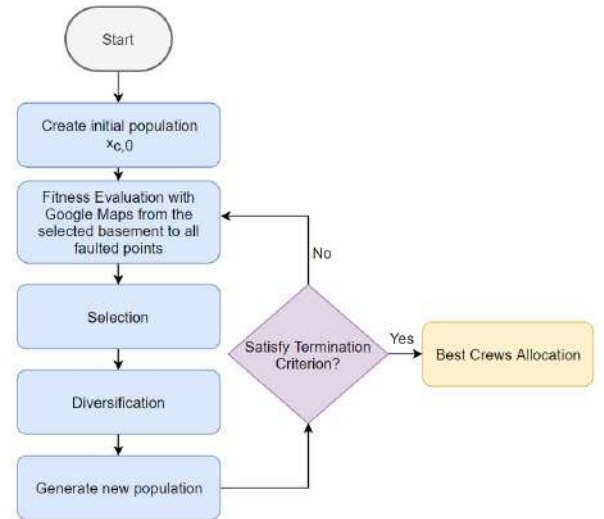


Figura 2. Flujograma de solución del problema.

Ya que la inicialización del algoritmo desde puntos no cercanos a puntos óptimos requiere de un mayor número de consultas, este

fenómeno aumenta el tiempo de cálculo y el costo por consultas a la base de datos de Google. Con el fin de evitar pago por un alto número de consultas, se usa la estrategia de análisis de datos incluida en [20]. En esta misma se identifican clústeres de eventos para reducir el total de eventos considerados y por lo tanto el número de evaluaciones necesarias en cada iteración del proceso de optimización. La Figura 3 muestra los candidatos para inicializar el algoritmo de posicionamiento. Con estos, tanto el número de consultas como los tiempos de convergencia a soluciones óptimas se pueden reducir de forma importante una vez se evita la inicialización aleatoria, o se puede converger a una mejor solución dadas unas restricciones de número de consultas y/o tiempo de cómputo. La Tabla 1 muestra una comparación de las mejoras alcanzadas con los distintos métodos de inicialización, ante el mismo límite en el número de consultas a Google.

Tabla 1. Efecto del método de inicialización.

	Inicialización aleatoria	Inicialización clúster
Mejora alcanzada	64,1%	81,0%

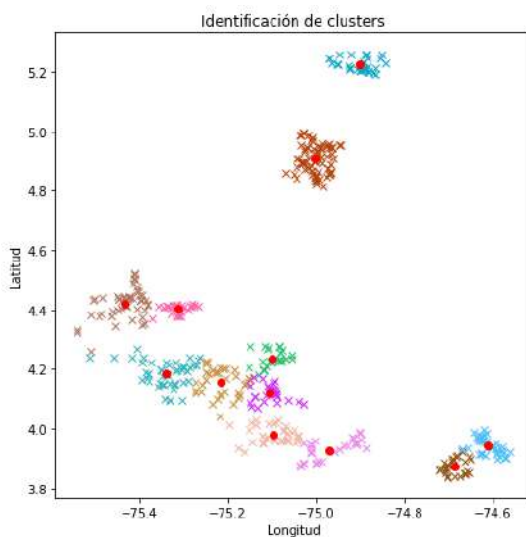


Figura 3 Clúster de ubicación basada en presencia de fallas

VI. CASOS DE ESTUDIO

Con el fin de observar el desempeño del algoritmo se tomaron dos escenarios de estudio. Uno incluía un sistema estándar de prueba IEEE 34 nodos y el otro hacía uso de datos reales registrados en una red rural en el departamento del Tolima. Para los dos escenarios se supuso que el punto inicial de ubicación de las cuadrillas de mantenimiento, antes de la ejecución del algoritmo, se encontraba en el centro de masa producto de la cantidad de eventos en el área de estudio. Esta suposición es normalmente reflejada en zonas urbanas y rurales. En ciudades, se observa que los centros de despacho de personal de mantenimiento se encuentran cercanos a zonas con alto impacto, que resultan en las que existe mayor número de individuos; por otra parte en pueblos, veredas y zonas con baja densidad poblacional, las cabeceras municipales son los lugares que contienen mayor número de usuarios y por ende el mayor impacto, lo que sugiere el posicionamiento de sedes principales de personal de mantenimiento en dichos lugares.

Caso A. IEEE 34 nodos - red urbana

El sistema IEEE 34 nodos representa un alimentador de voltaje nominal de 24.9 kV en una red urbana, además cuenta con elementos típicos encontrados en la red de distribución de la ciudad de Bogotá. Por dicha razón, se adapta a la geografía de la ciudad para así simular las condiciones de respuesta ante falla esperada en regiones con altas magnitudes de tráfico. La Figura 4 muestra el resultado de dicha adaptación. En ésta, los puntos azules muestran los lugares donde se concentraron los usuarios. En este caso se asumió que cada uno de los usuarios tiene una capacidad instalada de 5 kW, esto permitió representar la demanda en número de usuarios. Por otro lado, con el fin de realizar una evaluación rápida del desempeño del algoritmo y ante ausencia de tasas de falla para este sistema de prueba, se asumió la misma tasa

de falla para todos los puntos con usuarios, de tal forma que $\mu_\phi = 1\forall\phi$.

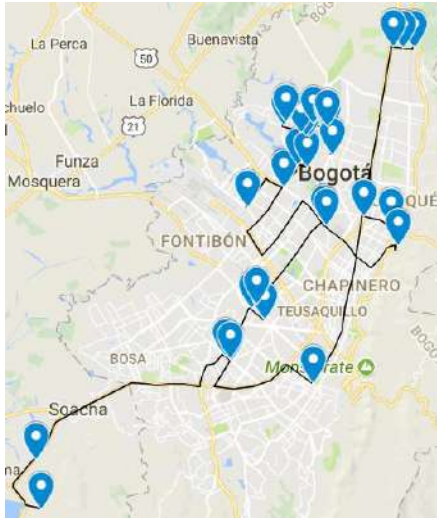


Figura 4 Planteamiento geográfico propuesto para la red IEEE-34, que constituye el caso de estudio 1

Caso B red real rural Colombiana

El desempeño del algoritmo en una red rural existente fue registrado mediante pruebas realizadas al sistema del OR Enertolima en la red de distribución del área del municipio de Cunday, Tolima. La información compartida incluía entre otras variables: localización (longitud y latitud) y tasa de falla, tipo de falla y cantidad de usuarios afectados. Ya que el área para cubrir los clientes del municipio de Cunday presenta una mayor extensión a la observada en el sistema IEEE 34 nodos, se utilizan cuatro cuadrillas para resolver la totalidad de los eventos registrados.

VII. RESULTADOS

La Tabla 2 muestra los resultados alcanzados al evaluar el algoritmo en los casos mencionados en la anterior sección.

Tabla 2. Resultados SAIDI antes y después de usar algoritmo de optimización.

	$SAIDI_{t,0}$	$SAIDI_{t,f}$	$\Delta\%$
Caso A	1,50	1,00	33,1%
Caso B	3,93	1,15	70,7%

La columna $SAIDI_{t,0}$ indica el valor de $SAIDI_t$ alcanzado cuando todas las cuadrillas inician su despacho desde el punto con alta densidad poblacional. En los valores registrados en la columna $SAIDI_{t,f}$ se representa el $SAIDI_t$ logrado cuando las cuadrillas son localizadas según lo indicado por el algoritmo de optimización. En el caso A, se muestran reducciones mayores del 30%, mientras que el uso del algoritmo en el caso B, permite mejoras en el SAIDI producido por el traslado de personal, mayores al 70%. En el segundo caso, se observa que las dificultades de movilidad favorecen la nueva distribución propuesta por el algoritmo. Los puntos finales para localizar los vehículos de reparación de estados de falla, se muestran en la Figura 5.

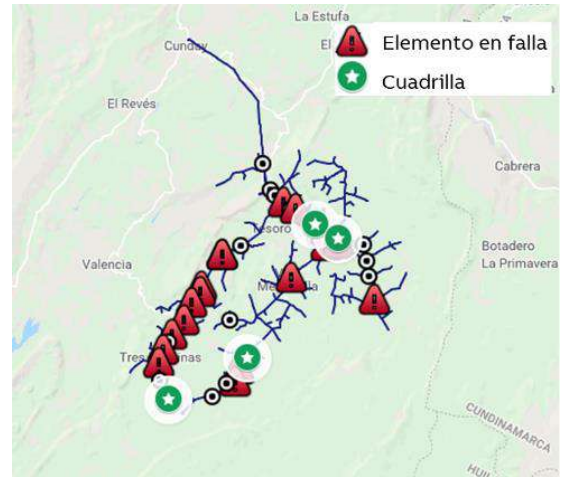


Figura 5 Ubicación de las cuadrillas en el circuito Cunday

VIII. CONCLUSIONES

El documento presenta una propuesta novedosa y flexible para mejorar los indicadores de confiabilidad en diferentes configuraciones de

red y grados de ruralidad en compañías distribuidoras. La aproximación descrita integra indicadores de desplazamiento reales almacenados en plataformas Cloud de Google Maps, que permiten la integración de las nuevas tecnologías de la información a las herramientas de gestión de recursos de mantenimiento. Por otro lado, la herramienta muestra resultados prometedores para el mejoramiento de la calidad del servicio que reciben los usuarios al reducir los tiempos de ausencia de energía, aumento de los incentivos producidos por reducción de tiempos de indisponibilidad, reducción de los costos asociados al combustible consumido y los relacionados al uso de personal de mantenimiento.

IX. RECONOCIMIENTOS

Especial agradecimiento al área de distribución de Enertolima S.A. E.S.P. que compartió información almacenada de eventos ocurridos en la red y de estadísticas de respuesta en el sistema. En especial al área de planeación técnica y operación de la red.

X. REFERENCIAS

- [1] J. J. Naresky, "Reliability Definitions," *IEEE Trans. Reliab.*, vol. R-19, no. 4, no. November, pp. 198–200, 1970.
- [2] I. Power and E. Society, *IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices*, vol. 2012, no. May, 2012.
- [3] Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, "Diagnóstico de la calidad del servicio de energía eléctrica en Colombia," p. 5,9, 2017.
- [4] E. E. Regulators and C. Saint-michel, "CEER Benchmarking Report 5 . 1 on the Continuity of Electricity Supply Data update," no. February, pp. 1–23, 2014.
- [5] CREG, *Creg 015-2018*. Bogotá, Colombia: CREG.
- [6] A. B. Kanase-Patil, R. P. Saini, and M. P. Sharma, "Integrated renewable energy systems for off grid rural electrification of remote area," *Renew. Energy*, vol. 35, no. 6, pp. 1342–1349, 2010.
- [7] X. Zhang, Z. Bie, and G. Li, "Reliability assessment of distribution networks with distributed generations using Monte Carlo method," *Energy Procedia*, vol. 12, pp. 278–286, 2011.
- [8] A. Arias, R. A. Hincapié, M. Granada, and R. A. Gallego, "Optimal scheduling of vegetation maintenance underneath overhead power distribution lines," *Proc. 2012 6th IEEE/PES Transm. Distrib. Lat. Am. Conf. Expo. T D-LA 2012*, pp. 1–6, 2012.
- [9] P. A. Kuntz, R. D. Christie, and S. S. Venkata, "Optimal Vegetation Maintenance Scheduling of Overhead Electric Power Distribution Systems," *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 22, no. 7, p. 64, 2002.
- [10] J. Holland, *Five-Minute Mba In Corporate Finance*. GrawHill, Mc, 2009.
- [11] A. Chowdhury and D. Koval, "Power Distribution System Reliability: Practical Methods and Applications," in *Power Distribution System Reliability: Practical Methods and Applications*, 1st ed., W.-I. Press, Ed. Wiley-IEEE Press, 2009.
- [12] A. A. Girgis, C. M. Fallon, D. L. Lubkeman, and S. Member, "A Fault Location Technique for Rural Distribution Feeders," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 29, no. 6, pp. 1170–1175, 1993.
- [13] J. Zhu, D. L. Lubkeman, and A. A. Girgis, "Automated Fault Location and Diagnosis on Electric Power Distribution Feeders," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 12, no. 2, 1997.
- [14] Google, "Developer Guide- Google Maps Platform." [Online]. Available: <https://developers.google.com/maps/documentation/directions/intro>.
- [15] G. de Distribución, "Informe Bimestral Área de distribución-2017," Ibagué.
- [16] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, "The Internet of Things: A survey," *Comput. Networks*, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, 2010.
- [17] S. Rusitschka, K. Eger, and C. Gerdes, "Smart Grid Data Cloud: A Model for Utilizing Cloud Computing in the Smart Grid Domain," *2010 First IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun.*, pp. 483–488, 2010.
- [18] F. Wang and Y. Xu, "Estimating O-D travel time matrix by Google Maps API: Implementation, advantages, and implications," *Ann. GIS*, vol. 17, no. 4, pp. 199–209, 2011.
- [19] Google, "Google Maps Platform Terms of Service." [Online]. Available: <https://cloud.google.com/maps-platform/terms/>. [Accessed: 09-Mar-2018].
- [20] T. Valencia and D. Rodriguez, "Posicionamiento Óptimo de Cuadrillas basado en estadísticas de tránsito de Google Maps e indicadores de Confiabilidad," *Premio ÁMBAR Investig. Y Desarro.*, 2018.