

Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Maestría en Ingeniería Eléctrica



Optimización de tiempos de atención de fallas en redes de distribución de energía eléctrica

Autor:

Ing. Edison Velasco Duarte

Director:

Ing. Ivan Camilo Duran PhD

Bogotá D.C, Colombia

Febrero, 2023

Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Maestría en Ingeniería Eléctrica

Optimización de tiempos de atención de fallas en redes de distribución de energía eléctrica

Ing. Edison Velasco Duarte

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Ingeniería Eléctrica

con énfasis en:

Sistemas de Potencia

Director(a):

Iván Camilo Duran, (PhD, MsC)

Grupo de Investigación:

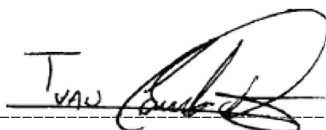
Modelación Estratégica de Energía y Potencia

Bogotá D.C, Colombia

2023, febrero

Aceptación del Jurado

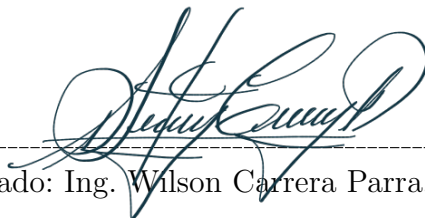
El Trabajo de grado de Maestría titulado **Optimización de tiempos de atención de fallas en redes de distribución de energía eléctrica**, presentado por **Ing. Edison Velasco Duarte**, cumple con los requisitos establecidos por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito para optar al título de Magister en Ingeniería Eléctrica con énfasis en Sistemas de Potencia.



Director(a): Ivan Camilo Duran, (PhD, MSc.)



Jurado: Ing. Angélica Sarmiento Lapesqueur, MSc.



Jurado: Ing. Wilson Carrera Parra, MSc.

Bogotá D.C, Colombia
17 de febrero de 2023

Dedico este trabajo de grado a mi padre Dumar, que sin formación me enseñó la ingeniería de la vida con absoluta humildad, a mi madre Esperanza, que con amor me dio ejemplo de tenacidad e inculcó en mí valores inquebrantables, a mis hijos Sara Sofia y Juan David que son el motor alegre de mis días y a mi esposa Dary que me acompaña en el camino de la vida.

Agradecimientos

Agradezco a mi director de Tesis Dr. Iván Camilo Duran por el apoyo brindado durante todo este tiempo, sus conocimientos aportados y su lúcida orientación; a la empresa PROING SA por aportar toda la información necesaria para el desarrollo de este trabajo y a mis hijos por su paciencia y motivación alegre.

Resumen

En la actualidad, la sociedad exige cada vez más y mejores servicios. La energía eléctrica por ser uno de los principales insumos para el desarrollo económico está siempre en el foco de mejoramiento y de exigencia de todos los usuarios y por ello sus atributos de calidad son regulados por el estado mismo. En este sentido, la continuidad es uno de los factores que más afecta la calidad de la prestación del servicio y su mejoramiento depende de la reducción de los tiempos de atención de las fallas que se presenten en la red; y este es un problema complejo por su naturaleza aleatoria tanto en tiempo como en tipología y ubicación, además de los recursos que se requieren para resolverlo.

Este trabajo presenta una metodología segura y confiable de aprendizaje continuo que predice el comportamiento de la volumetría de las fallas durante el día, la ubicación de estas de acuerdo a su tipología y un esquema de medición de las habilidades de las cuadrillas para la asignación eficiente de fallas de tal manera que se asegure un menor tiempo de despeje y la seguridad del personal.

Abstract

Nowadays, society demands more and better services. The electric energy as one of the main inputs for economic development, it is always in the spotlight for improvement and demand of all users and therefore its quality attributes are regulated by the state itself. In this sense, continuity is one of the factors that most affects the quality of the provision of the service and its improvement depends on the reduction of the attention times of the faults that appear in the network; and this is a complex problem due to its random nature both in time and in typology and location, in addition to the resources required to solve it.

This work presents a safe and reliable continuous learning methodology that predicts the behavior of the volumetry of the faults during the day, their location according to their typology and a measurement scheme of the abilities of the team members, in order to set up an efficient allocation of faults in such a way as to ensure a shorter time of clearance and personnel safety.

Contenido

Agradecimientos	III
Resumen	VI
Abstract	VIII
Contenido	IX
Lista de figuras	XII
Lista de tablas	XIII
Lista de símbolos	XV
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.1.1. Descripción del problema	3
1.1.2. Formulación del problema	4
1.2. Estado del arte	4
1.3. Objetivos	12
1.3.1. Objetivo general	12
1.3.2. Objetivos específicos	12
1.4. Organización del documento	13
2. Marco teórico	15
2.1. Cadenas de Markov	16
2.2. Teoría de Colas	18
2.3. Clasificación de las fallas de acuerdo con su naturaleza	19
2.3.1. Clasificación de causas de salidas de líneas y redes eléctricas	20
2.3.2. Caracterización de los fallos	21
2.4. Gestión de las habilidades del personal	21
3. Metodología y caso de estudio	25
3.1. Metas de Indicadores de Gestión	27
3.2. Análisis de la volumetría de las fallas	28

3.3. Modelo de predicción del volumen de fallas	30
3.3.1. Cadenas de Markov	32
3.4. Clasificación de las fallas	36
3.5. Ubicación de Zonas de Fallas	38
3.5.1. Concentración de fallas en los medidores	38
3.5.2. Concentración de fallas en las acometidas	39
3.5.3. Concentración de fallas en la red de baja tensión	40
3.5.4. Concentración de fallas en transformadores	41
3.5.5. Concentración de fallas en la red de media tensión	43
3.6. Modelamiento de las Habilidades	44
4. Análisis de resultados	47
4.1. Resultados de la experiencia	48
4.2. Complemento del modelo	53
5. Conclusiones	59
5.1. Conclusiones generales	59
5.2. Aportes	60
5.3. Trabajos futuros	61
Referencias	63

Lista de Figuras

1.1.	Diagrama de dos estados y secuencia de reparación de componentes	5
1.2.	Promedio de demanda de energía por día de la semana. Tomado de XM para agosto de 2022.	6
1.3.	Curvas de demanda por sector	7
1.4.	Volumen de fallas por hora	7
1.5.	Tiempos de reparación de fallas.	8
1.6.	Flujograma de solución de problema de ubicación de cuadrillas.	9
1.7.	Cluster de ubicación de fallas.	10
1.8.	Cluster de ubicación de fallas geográfico para la red IEEE-34.	11
1.9.	Cuadrillas por Zonas.	11
1.10.	Modelo de Cola de proceso de reparación	12
1.11.	Transición de estados según cadenas de Markov	13
3.1.	Mapa de Procesos	25
3.2.	Promedio de Aparición de Fallas por Día por Hora	30
3.3.	Fallas por día, por hora y por mes	31
3.4.	Fallas por hora, por mes	31
3.5.	jueves julio vs jueves enero	32
3.6.	Estados de Markov	33
3.7.	Estados de Markov por Hora, predicción	35
3.8.	Predicción	36
3.9.	Zonificación de fallas en los medidores	39
3.10.	Zonificación de fallas en las acometidas	40
3.11.	Zonificación de fallas en la red de baja tensión	41
3.12.	Zonificación de fallas en transformadores	42
3.13.	Zonificación de fallas en la red de media tensión	43
3.14.	Cuadrilla A	45
3.15.	Cuadrilla B	45

4.1. Capacidad operativa vs fallas	49
4.2. Ubicación de cuadrillas	50
4.3. Oportunidad de Atención Clientes Masivos	51
4.4. Oportunidad de Atención Mayor Impacto	52
4.5. Llegada al Primer Punto	53
4.6. Fallas en febrero vs noviembre	54
4.7. Capacidad operativa febrero vs noviembre	55
4.8. Predicción vs Real	56
4.9. Nueva ubicación de cuadrillas	57
4.10.Evolución del rendimiento de una cuadrilla	58
4.11.Evolución del rendimiento general	58

Lista de tablas

3.1. Promedio de Aparición de Fallas por Día y por Hora	29
3.2. Estados de Markov	33
3.3. Extracto de tabla de cambios de estados históricos	34
3.4. Predicción de Estados	35
3.5. Clasificación de fallas por usuarios impactados vs incidencia	37
3.6. Clasificación de fallas por su ubicación vs usuarios impactados	37
3.7. Clasificación de fallas por ubicación vs equipamiento requerido	37
3.8. Clasificación de causas por su ubicación	38
4.1. Capacidad operativa	48

Lista de abreviaturas

- CREG: Comisión de Regulación de energía y Gas.
- DES: Indicador regulatorio de duración equivalente de las Interrupciones del Servicio.
- FES: Indicador regulatorio de Frecuencia Equivalente de la Interrupciones del Servicio.
- ITAD: Indicador regulatorio de Índice de Referencia Agrupado de discontinuidad.
- IRAD: Indicador regulatorio de Índice de Referencia Agrupado de la Discontinuidad.
- SDL: Sistema de Distribución Local
- SAIDI: Indicador regulatorio de Duración promedio de las interrupciones percibidas por un usuario.
- SAIFI: Indicador regulatorio de la cantidad de veces promedio que se presenta una interrupción para un Usuario
- SD: Sistema de Distribución
- OR: Operador de Red
- SCADA: Supervisory Control And Data Acquisition (Control Supervisor y Adquisición de Datos)
- IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica)
- API: interfaz de programación de aplicaciones.
- FIFO: First in, First Out (primero en entrar, primero en salir)
- COVID-19: Enfermedad descubierta en el año 2019 causada por un nuevo coronavirus.
- AEM: Indicador de Oportunidad de Atención de fallas en Clientes Masivos

- AMI: Indicador de Oportunidad de Atención de fallas de Mayor Impacto.

Capítulo 1

Introducción

En el mundo actual la exigencia de altos estándares de calidad en todos los servicios es cada vez más retadora y el servicio de energía eléctrica no es la excepción. La sociedad, la industria y la regulación exigen cada vez más y mejores servicios que obligan a las empresas a reinventarse constantemente para satisfacer las necesidades de los usuarios. Uno de los principales factores de la calidad del servicio de energía es la continuidad del mismo la cual se puede medir por la cantidad de fallas en un periodo de tiempo, el tiempo de duración de la falla y la cantidad de usuarios que las perciben.

Las fallas en un sistema de distribución tienen un comportamiento aleatorio caracterizado por diferentes factores como el clima, uso del servicio, estrato socioeconómico, topología de la red, vida útil de los equipos que componen la red, entre otros [1]. Por otro lado, el tiempo de la atención de las fallas también tiene un comportamiento aleatorio que está caracterizado igualmente por algunos factores en común como la capacidad operativa destinada para esta tarea, el entrenamiento de los grupos técnicos, rendimiento y el monitoreo de las operaciones; lo que se puede resumir como la capacidad estratégica del operador encargado de despejar las fallas.

Generalmente se estudia al fenómeno de aparición de fallas como un proceso aleatorio de naturaleza exponencial y el despeje de fallas como un fenómeno estocástico de tiempos medios para la determinación de la capacidad operativa [2]; sin embargo, la tarea operativa de ejecutar los despejes de estas fallas trae la inevitable necesidad de cumplir con los tiempos de atención establecidos en la regulación y/o acuerdos de niveles de servicio al menor costo posible.

Por esto nace la necesidad de investigar y proponer nuevas metodologías que permitan optimizar los recursos técnicos, económicos y simultáneamente cumplir con las exigencias de calidad del mundo actual.

1.1. Planteamiento del problema

En el año 1992 Colombia vivió un fuerte fenómeno del niño donde las altas temperaturas crearon sequías prolongadas que disminuyeron en gran medida los niveles de los embalses en un momento en que el país dependía sensiblemente de la generación hidroeléctrica [3]. Esto generó una grave crisis energética que obligó al gobierno a tomar medidas como el racionamiento de energía que consiste en la implementación de cortes de energía eléctrica en todo el país y oficializar el adelanto de una hora para aprovechar más la luz del sol. Así mismo, la crisis develó la debilidad institucional y la insolvencia económica de las empresas que componían el sector que en ese momento eran estatales e hizo evidente la necesidad de una reforma de fondo, en todo lo concerniente a la prestación del servicio público.

En ese sentido el gobierno adoptó una política nacional de generación, transmisión, interconexión y distribución de fuentes alternas dictando las leyes 142 y 143 de 1993 que son consideradas las rectoras del nuevo modelo del servicio y creó los organismos necesarios para planear y regular las nuevas reglas del mercado y la prestación del servicio. Uno de los organismos creados fue la Comisión de regulación de Energía y Gas (CREG) [4]. A este organismo se le encargó la tarea de regular el ejercicio de las actividades del sector para asegurar la disponibilidad de una oferta eficiente y propiciar la competencia del sector eléctrico.

Se puede afirmar que el principal aporte de lo ocurrido en ese entonces fue la promoción de la competencia y darle voz a los usuarios que empezaron a exigir cada vez más servicio de mejor calidad a precios razonables.

En búsqueda de la satisfacción de los usuarios en cuanto al mejoramiento de la calidad del servicio de energía, la CREG ha emitido numerosas resoluciones determinando y regulando los atributos de calidad entre ellos la confiabilidad del servicio que se determina por la cantidad y la duración de las interrupciones del servicio que son percibidas por los usuarios.

En el transcurso del tiempo se establecieron indicadores que las empresas están obligadas a cumplir como lo fueron en su momento el indicador de Duración Equivalente de las Interrupciones del Servicio (DES) y de Indicador de Frecuencia Equivalente de las Interrupciones del Servicio (FES) establecidos en la resolución 025 de 1999 y posteriormente el Índice Trimestral Agrupado de la Discontinuidad (ITAD) y el Índice de Referencia Agrupado de la Discontinuidad (IRAD), la Duración total en horas de los eventos que en promedio percibe cada usuario del SDL de un OR (SAIDI) y Cantidad total de los eventos que en promedio perciben todos los usuarios del SDL de un OR (SAIFI); así como la Duración total de los

eventos que percibe cada usuario del SD de un OR en un periodo anual (DIU) y la Cantidad total de eventos que percibe cada usuario del SDL de un OR en un periodo anual (FIU) que determinan la calidad individual que perciben los usuarios [5].

El no cumplimiento de los indicadores de calidad trae consigo diversas dificultades que van desde el detrimento económico por aplicación de factores negativos en la fórmula tarifaria, pasando por el detrimento de la imagen de las empresas prestadoras del servicio ante los usuarios y llegando hasta desenlaces jurídicos como el presentado en la zona caribe donde el estado se obligó a intervenir a la empresa prestadora del servicio y asignar esa responsabilidad a nuevas empresas.

Con el objetivo de cumplir con los indicadores calidad en cuanto cantidad y duración de las fallas, las empresas prestadoras del servicio de energía generalmente disponen de sofisticados sistemas de automatización de la red, generalmente de tipo SCADA [6] obteniendo en tiempo real los parámetros de calidad y continuidad del servicio y adicionalmente canales de atención al usuario como Call Center's, redes sociales, páginas web, etc. donde se reciben las alertas de fallas del servicio y asigna ordenes de trabajo al área operativa donde se dispone de grupos técnicos durante las 24 horas del día, los cuales son monitoreados y despachados desde un centro de control hacia los sitios donde se generan las fallas.

1.1.1. Descripción del problema

Como se mencionó anteriormente las áreas operativas de las empresas prestadoras del servicio de energía, dispone de grupos técnicos durante las 24 horas del día para atender las fallas reportadas por los usuarios.

El problema radica en que es necesario satisfacer la necesidad de los clientes restableciendo el servicio en el menor tiempo posible con la inevitable restricción de minimizar los costos y guardar la seguridad de los operarios. Y es precisamente en este sentido donde se hace necesario observar con detenimiento los aspectos importantes en este complejo problema.

La aparición de las fallas en la red tiene un comportamiento aleatorio que además de comportarse como una distribución de probabilidad de tipo exponencial [2] con una determinada concentración geográfica [7], también presenta una distribución horaria que se puede modelar utilizando la metodología de cadenas de Markov y deben ser atendidas por personal operativo en un proceso que a su vez se puede caracterizar con ayuda de la teoría de colas [8], cuyo éxito depende de la capacidad del operador para asegurar la cantidad de cuadrillas

necesarias [2] y el prelistamiento efectivo, pero sobre todo de la gestión de las capacidades de los grupos técnicos. La combinación de todos estos factores son los que permiten optimizar los tiempos de atención de las fallas evitando ineficiencias, riesgos a la integridad física de los operarios, sobre costos operativos y la susceptible insatisfacción del usuario.

De acuerdo a la revisión bibliográfica, los análisis realizados hasta la fecha estudian el fenómeno de aparición y atención de fallas como procesos de acuerdo al desempeño y resultados obtenidos desde el punto de vista del operador de red, sin embargo, no se ha realizado una propuesta metodológica de gestión que conduzca a la mejora de los resultados considerando un modelo de predicción horaria, las aristas logísticas, técnicas, económicas y sobre todo humanas que intervienen en los resultados.

1.1.2. Formulación del problema

De acuerdo a los antecedentes y el problema planteado se observa que es necesario investigar si ¿Es posible determinar una metodología que conduzca a optimizar los tiempos de atención de fallas en redes de distribución gestionando los centroides de concentración de fallas y las destrezas de los operarios y los grupos técnicos de acuerdo a la naturaleza de las fallas?

1.2. Estado del arte

Según la definición de la IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) la confiabilidad es “*la capacidad de un sistema o componente para realizar sus funciones requeridas bajo condiciones establecidas por un período específico de tiempo*” [9]. Ahora bien; es importante reconocer que la red de distribución de energía eléctrica es un sistema compuesto por elementos que en su mayoría son reparables, es decir que después de una falla puede volver a las condiciones necesarias para continuar operando con el uso de algunos elementos consumibles o en algunos casos repuestos intercambiables donde el tiempo de reparación es no nulo.

En este sentido los elementos reparables alternan entre un estado de disponibilidad y otro de indisponibilidad y la característica de fiabilidad del elemento más utilizada es la intensidad de fallo que equivale a la densidad de renovación donde la función se puede escribir como:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(s)ds \quad (1.1)$$

Donde $f(s)$ es la función de densidad de probabilidad de los tiempos hasta el fallo del

elemento. [10]

Un componente reparabile, es aquel que soporta una secuencia de fallas y tiene la capacidad de volver a su estado inicial de servicio. En este orden de ideas, los componentes reparables alternan en estados de bueno y en falla como se muestra en la figura 1.1.

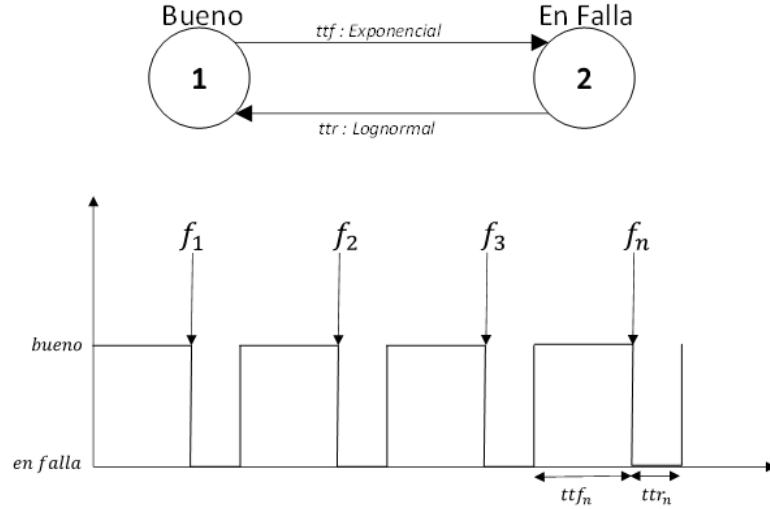


Figura 1.1: Diagrama de dos estados y secuencia de reparación de componentes

De esta manera se puede definir una cadena de Markov usando como P_1 y P_2 la probabilidad de encontrar el elemento en estado de falla o bueno y λ y μ respectivamente, como la tasa de falla y la tasa de reparación.

$$\begin{pmatrix} dP_1(t)/dt \\ dP_2(t)/dt \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\lambda & \mu \\ \lambda & -\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

Como el objetivo de mejorar el servicio en términos de confiabilidad es asegurar una respuesta cada vez más rápida ante los eventos de falla, se requiere entonces modelar el proceso de reparación donde generalmente se usan conceptos de teoría de colas y procesos estocásticos puntuales y se evalúa el desempeño del proceso de reparación mediante métodos de simulación de Montecarlo secuencial. Los análisis de este tipo reflejan que “1. La entrada y el servicio del modelo de proceso de reparación no son necesariamente una distribución de Poisson homogénea; por lo tanto, se requiere el método de simulación Montecarlo para la evaluación del desempeño del proceso de reparación. 2. El índice que mejor refleja el desempeño

del proceso de reparación es el tiempo medio de espera. Esta metodología proporciona una base para la programación óptima de los recursos de reparación de acuerdo con el proceso de falla y los objetivos de los índices de confiabilidad” [11]

Para entender la distribución de la densidad de la renovación de los fallos descritos en esta función, es necesario observar el comportamiento de la demanda de energía en el transcurso del día ya que ésta determina el uso de la red y es la causa fundamental de los fallos; también es claro que la principal causa fundamental de los fallos es el mismo uso de la red; es decir, que un sistema que no es usado, en principio no debería fallar o visto desde otro punto de vista, la probabilidad de fallo aumenta en razón al uso que se dé a la red y al servicio.

En Colombia la curva de demanda está determinada principalmente por el uso residencial como se observa en la figura 1.2 tomado de [12], donde se observa que el pico de consumo más alto es entre las 8 y 9 de la noche cuando los usuarios generalmente están en casa; sin embargo, esta es una demanda mucho más distribuida geográficamente que el pico del medio día dado por el consumo del comercio y la industria, que generalmente se da en sectores mas concentrados y por ende genera unos flujos de corrientes mucho más altos en los circuitos que los abastecen provocando una mayor probabilidad de falla.

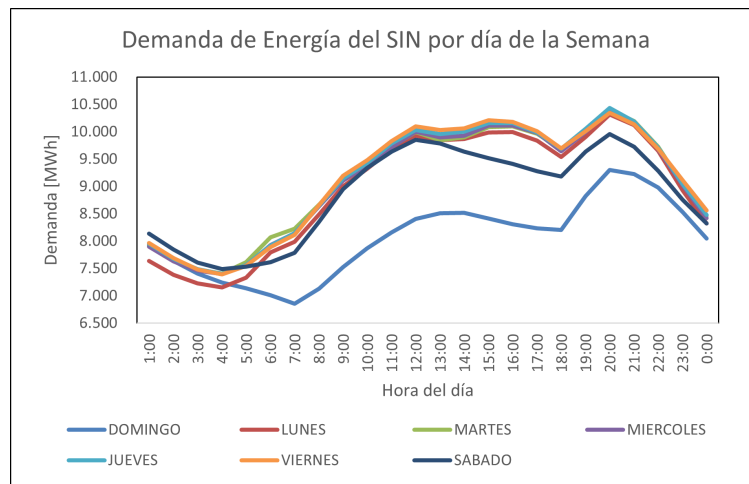


Figura 1.2: Promedio de demanda de energía por día de la semana. Tomado de XM para agosto de 2022.

El uso del servicio de energía eléctrica se puede caracterizar de acuerdo con los principales sectores que son Residencial, Comercial, Industrial y los picos máximos de la curva de demanda de cada uno se dan en horarios diferentes como se ejemplifica en la figura 1.3 y son

diferenciables entre sí por día de la semana como se evidencia en la curva de demanda diaria de XM presentada en la figura 1.2

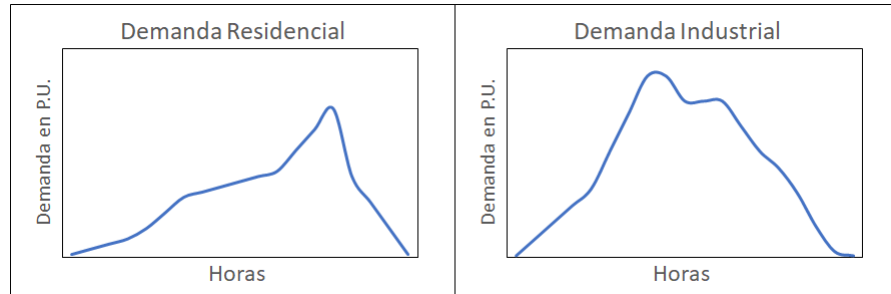


Figura 1.3: Curvas de demanda por sector

Esto explica de cierta forma que el volumen de fallas se presente de manera diferenciada durante las diferentes horas del día como se observa en la figura 1.4 es decir, que durante la noche hay pocas fallas porque hay poca demanda y así mismo durante el día se presentan picos de fallas en horarios similares en los que hay picos de demanda, por esta razón es necesario analizar la correlación entre los dos fenómenos con el objetivo de destinar el recurso operativo necesario para atenderlas en la medida en que se van presentando.

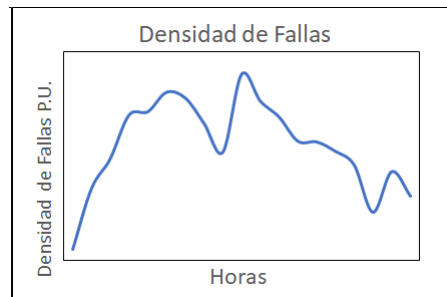


Figura 1.4: Volumen de fallas por hora

La diversidad del comportamiento de la demanda de energía eléctrica hace que sea muy complicado determinar un modelo matemático que se ajuste al 100 % a la realidad, la incertidumbre de la demanda hace que los modelos de predicción tengan errores y por ello se trata de segmentar el mercado en residencial, comercial e industrial [13]. La demanda eléctrica es la que pone las reglas del juego en tanto para las necesidades del sistema, como para la dinámica de las fallas y estas mismas reglas son puestas por los usuarios finales.

Dado que la concentración del comercio y la industria es mayor que la del sector residencial, es lógico deducir que la demanda derivada de estos sectores es más propensa a producir fallas por el estrés que se genera en los circuitos debido a los altos flujos de corrientes. Por ello el volumen de fallas que se muestra en la figura 1.4 tiene un comportamiento similar a la demanda en el sector industrial que se muestra en la figura 1.3.

Por otro lado, debido a la misma concentración de los diferentes sectores económicos, la capacidad de los circuitos, la vida útil de los componentes de la red y los factores exógenos generan una acumulación geográfica de las fallas dentro del área de cobertura con una tipología particular, lo que hace necesario preparar toda una logística y contar con los recursos disponibles oportunamente que tengan la capacidad de despejar la falla en el menor tiempo posible.

Después de una falla permanente en un sistema de distribución, existen por lo menos tres formas de restablecer el servicio: a través de reparaciones de componentes, reemplazo de componentes u operaciones de conmutación [1] que siempre requieren de la atención presencial de cuadrillas especializadas para cada tipo de fallas. En este sentido el tiempo total de atención de la falla está afectado directamente por el tiempo de desplazamiento y la ubicación de la falla; en otras palabras, el tiempo total necesario para reparar la falla está compuesto por tres factores fundamentales que son: a) Tiempo de identificación, b) Tiempo de desplazamiento de la cuadrilla y c) Tiempo de reparación. En la figura 1.5 [7], se muestran los tiempos para las distintas etapas.

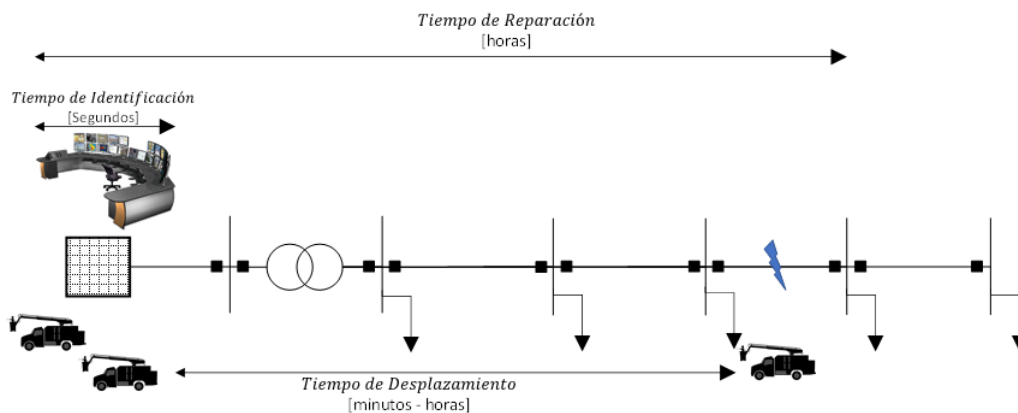


Figura 1.5: Tiempos de reparación de fallas.

Existen diferentes formas para localizar fallas en los sistemas de distribución de energía. La mayoría de ellas estiman la distancia relativa a la falla a partir de la adquisición de datos

proporcionada por los dispositivos de protección y las más modernas utilizan el sistema de comunicación AMI para detectar los medidores que han perdido comunicación o emite un diagnóstico de falla [14]. La eficiencia de cada una de estas metodologías puede verse afectada debido a algunas características particulares de la red, tales como sistemas desbalanceados, conductores no homogéneos, sistemas con alto grado de ramificación, etc. [15].

Por lo tanto, el tiempo de identificación de la falla generalmente está asociado a los elementos identificadores con que cuente la red. Es decir que entre más elementos identificadores de falla tenga la red, más se reducen las dimensiones de las secciones donde se puede encontrar la falla y así mismo se puede direccionar con mayor certeza el lugar al que se debe desplazar la cuadrilla, todo complementado por un sistema de acopio de reportes o llamadas por parte de los usuarios que actualmente se conocen como call centers, redes sociales, app's o páginas de internet. Así mismo el tiempo de reparación depende del tipo de activo que ha sufrido la falla y puede ser entre 2-5 horas o hasta 10 cuando existen elementos sustitutos disponibles o si se trata de una falla simple o múltiple [16].

Para los tiempos de atención de las fallas, el desplazamiento es un factor importante haciendo que los indicadores de calidad del servicio dependan en gran medida de otras variables como el medio de transporte, el tráfico, el horario, condiciones atmosféricas, ruralidad, vegetación, entre otros. Con relación a la ubicación geográfica de la concentración de las fallas de manera geográfica, en [7], se presenta una metodología para el posicionamiento óptimo de cuadrillas de mantenimiento usando información de Cloud de Google Maps e indicadores de confiabilidad como se muestra en la figura 1.6.

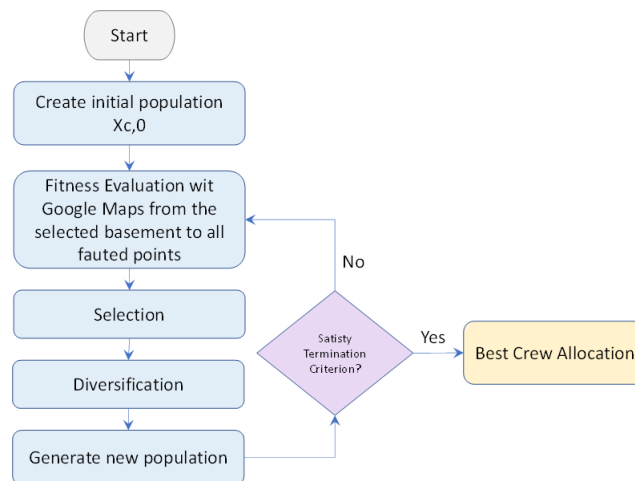


Figura 1.6: Flujograma de solución de problema de ubicación de cuadrillas.

Con el uso de Google Maps Distance Matrix API [17] se calcula las distancias a transitar y los tiempos de desplazamiento entre dos puntos cardinales o dos direcciones y se almacenan en una matriz. Por otro lado, usando Google Maps Directions API [18] se cuenta con indicaciones a seguir para desplazarse entre los dos puntos. Se puede definir el tiempo de salida, llegada y adicionalmente, con los API de Google y aplicando la metodología presentada en la figura 1.6 se logra ubicar los cluster de ubicación de fallas como se muestra en la figura 1.7 [7], basado en la presencia de fallas.

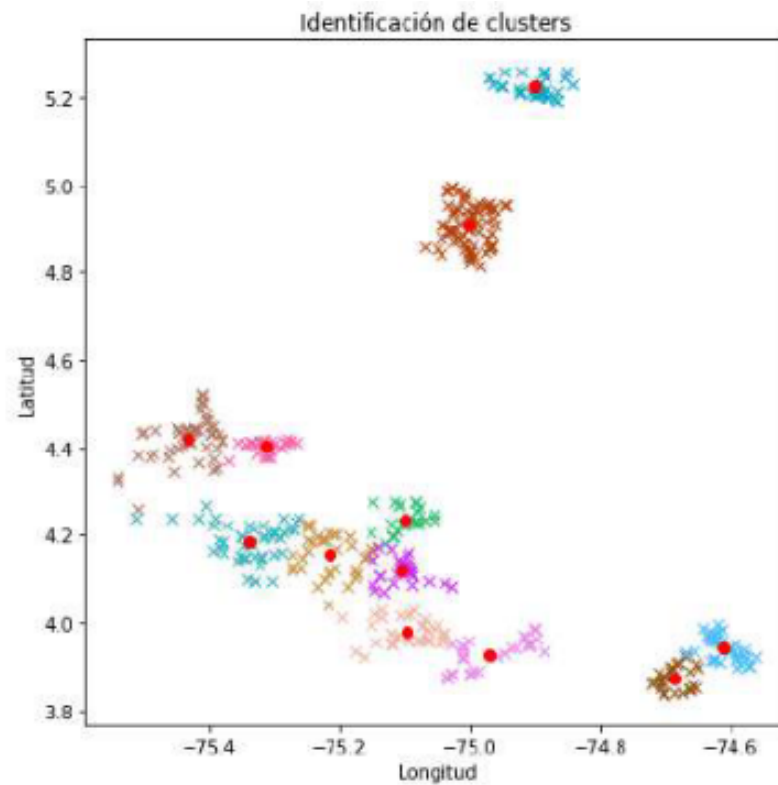


Figura 1.7: Cluster de ubicación de fallas.

Aquí se observa cómo se generan los centroides de concentración de fallas y sugiere una ubicación para las cuadrillas destinadas a despejar las fallas. El tamaño del agrupamiento dependerá de la capacidad de resolución que se le dé a cada cuadrilla y de distribución geográfica de las mismas y en la figura 1.8 [7], se aplica el modelo para la red IEEE-34 obteniendo como resultado la ubicación sugerida de las cuadrillas.

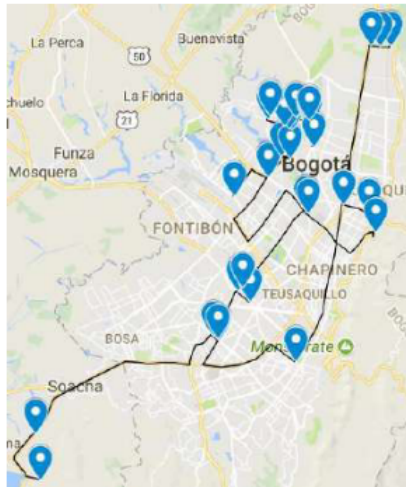


Figura 1.8: Cluster de ubicación de fallas geográfico para la red IEEE-34.

Para la planeación logística de la atención eficiente de las fallas, es necesario entonces modelar de manera explícita el sistema de distribución, segmentarlo por zonas, asignar una o varias cuadrillas a cada una como se presenta en la figura 1.9 [19], además se debe definir el equipamiento que deben llevar, las habilidades técnicas que requiere el personal, de acuerdo con la tipología de fallas que se tengan caracterizadas, los procedimientos definidos de operación y equipos asignados. Será también responsabilidad de la empresa encargada de gestionar la reparación de las fallas, gestionar los factores humanos y el aprendizaje continuo de los operarios superando las barreras de rotación de personal.

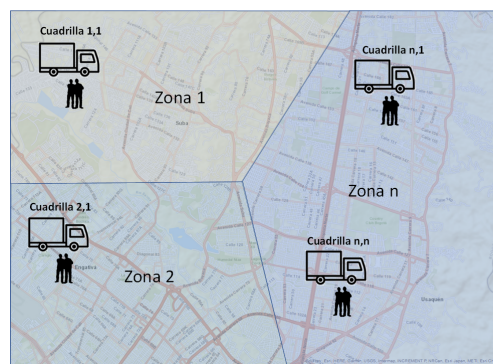


Figura 1.9: Cuadrillas por Zonas.

El proceso de reparación se convierte entonces en una frecuencia de reparaciones ejecutadas por las cuadrillas de acuerdo con las órdenes de trabajo asignadas desde el centro de

atención de Operador de red que recibe las llamadas de los usuarios o del centro de control donde se requiere la intervención del personal que debe estar previamente distribuido en terreno en las ubicaciones sugeridas y todo el equipamiento de acuerdo con su especialidad.

Como se observa en la figura 1.10, este es un sistema de colas donde la entrada son las fallas y la salida son las reparaciones ejecutadas por las cuadrillas.

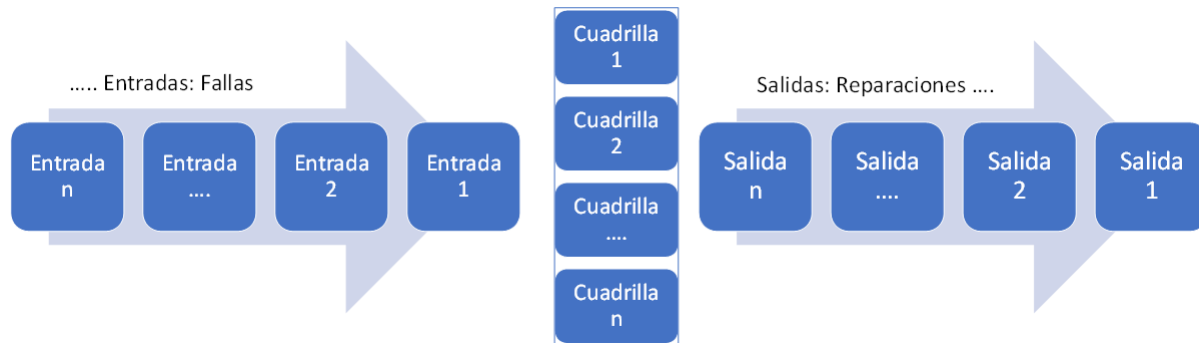


Figura 1.10: Modelo de Cola de proceso de reparación

De esta manera se completa el modelo de la cadena de Markov donde la transición de estado bueno a falla se comporta de manera Exponencial y debido a que la transición en sentido contrario de falla a bueno requiere de un proceso de reparación donde interviene toda una operación logística, se comporta de manera lognormal [20] como se muestra en la figura 1.11.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Proponer una metodología para la optimización de tiempos de atención de fallas en media y baja tensión en redes de distribución de energía eléctrica.

1.3.2. Objetivos específicos

- Ubicar geográficamente las zonas de concentración de fallas de media y baja tensión en la red de distribución
- Clasificar las posibles fallas objeto de estudio alineadas con las destrezas de los grupos técnicos.

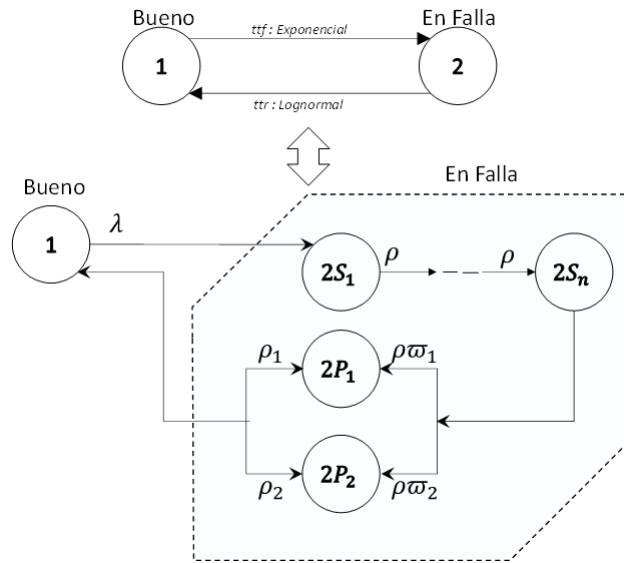


Figura 1.11: Transición de estados según cadenas de Markov

- Medir y gestionar las destrezas de los operarios en un modelo de habilidades de acuerdo con la naturaleza de las fallas.
- Proponer un método de monitoreo y asignación de órdenes de trabajo de acuerdo con la clasificación de las fallas y al modelo de habilidades de los operarios.

1.4. Organización del documento

Este documento inicia con el capítulo 1 en el que se hace una introducción y descripción del problema a abordar, continua con el capítulo 2 donde se describe el marco teórico de los conceptos técnicos necesarios para comprender la metodología presentada en el capítulo 3 donde al mismo tiempo se presentan los resultados del caso de estudio usado. En el capítulo 4 se hace el análisis de los resultados de la metodología propuesta y finalmente en el capítulo 5 se presentan las conclusiones, aportes y se proponen los trabajos futuros que pueden complementar la metodología propuesta.

Capítulo 2

Marco teórico

La demanda de energía es el indicador más importante que refleja la dinámica de cualquier economía por ser un factor de producción de alta relevancia en el sistema productivo, por ello es necesario mantener la continuidad del servicio con los más altos estándares de calidad y se logra cuando se mantiene el suministro de energía eléctrica con la menor cantidad de interrupciones posible en un periodo determinado de tiempo.

De acuerdo con lo establecido en la Ley 142 de 1994, la prestación continua de un servicio de buena calidad es la obligación principal de la empresa en el contrato de servicios públicos [21]. Esta obligación es regulada y vigilada por la CREG a través de la medición de los indicadores definidos para Colombia que son el SAIDI y el SAIFI que se calculan como se presenta en las ecuaciones 2.1 y 2.2

$$SAIDI = \frac{\sum_{i=1}^n t_i * u_i}{N} \quad (2.1)$$

$$SAIFI = \frac{\sum_{i=1}^n u_i}{N} \quad (2.2)$$

Donde,

t_i : Duración de cada interrupción

u_i : Número de usuarios afectados en cada interrupción

n : Número de interrupciones del periodo

N : Número de usuarios del sistema eléctrico o concesionaria al final del periodo

Por esta razón, las empresas encargadas de la operación de la red están en la obligación de minimizar los tiempos de atención de las fallas que inevitablemente se presentan durante la prestación del servicio.

Para la optimización de los tiempos de atención de las fallas, es necesario analizar con detenimiento el fenómeno de las fallas y sus características, causas, ubicación y dinámica de aparición. En este estudio interactúan diferentes disciplinas como las estadísticas, matemáticas, logísticas y de comportamiento humano ya que la aparición de las fallas en la red tiene un comportamiento aleatorio que además de comportarse como una distribución de probabilidad de tipo exponencial [2] con una determinada concentración geográfica [4], también presenta una distribución horaria que se puede modelar utilizando la metodología de cadenas de Markov [5], y deben ser atendidas por personal operativo en un proceso que a su vez se puede caracterizar con ayuda de la teoría de colas, cuyo éxito depende de la capacidad del operador para asegurar la cantidad de cuadrillas necesarias [2] y el prelistamiento efectivo, pero sobre todo de la gestión de las capacidades de los trabajadores que componen las cuadrillas.

2.1. Cadenas de Markov

Cualquier modelo realista de un fenómeno del mundo real debe tener en cuenta la posibilidad de aleatoriedad. Es decir, la mayoría de las veces, las cantidades que nos interesan no serán predecibles de antemano, sino que exhibirán una variación inherente que el modelo debe tener en cuenta [22].

La teoría de la probabilidad es cada vez más relevante en la forma en que entendemos el mundo que nos rodea. Porque permite estudiar cómo evoluciona una variable aleatoria a lo largo del tiempo. Si tenemos una cantidad específica de fallas que esperan por ser despejadas en un instante t , entonces hay una variable aleatoria X_t para cada instante t en el que observamos el número de fallas que esperan por ser despejadas y su comportamiento futuro depende únicamente de su estado actual [23].

Los modelos de los procesos de Markov se utilizan para el análisis de la evolución de los sistemas utilizando la información de los resultados de varios ensayos. Generalmente se trata de periodos sucesivos en donde no se puede determinar con certeza el estado del sistema; sino, que se usan probabilidades de transición para describir la forma en que el sistema sufre transiciones de un periodo al siguiente. Por lo tanto, el resultado de la técnica arroja la probabilidad de que el sistema se encuentre en un estado particular en un periodo de tiempo específico [24] de acuerdo a su estado actual.

La técnica llamada cadenas de Markov, fue desarrollada por el matemático Ruso Andrei A. Markov en 1906 quien postuló el principio de que existen ciertos procesos cuyo estado futuro sólo depende de su estado presente y es independiente de sus estados pasados. Al

principio se empleó para analizar procesos de física y meteorología. Una de las primeras aplicaciones fue el pronóstico de las condiciones climatológicas. Las aplicaciones más recientes incluyen el análisis de los movimientos de los precios de los artículos de consumo, el mantenimiento de maquinaria de alta precisión, el comportamiento de animales de laboratorio, la selección de productos de los consumidores, la longitud de las filas en los aeropuertos y los supermercados, variedad y tamaño de los inventarios, administración de plantas industriales [24] y en esta oportunidad lo estamos utilizando para la volumetría de las fallas del servicio de energía eléctrica en sistemas de distribución.

Las cadenas de Markov comprenden un tema particularmente importante de ciertos fenómenos aleatorios que afectan a sistemas de naturaleza dinámica y que se denominan procesos estocásticos.

Los procesos estocásticos son de interés para describir el comportamiento de un sistema en operación durante algunos periodos. Un proceso estocástico tiene la siguiente estructura. La condición actual del sistema puede estar en una de $M + 1$ categorías mutuamente excluyentes llamadas estados. Por conveniencia en la notación, estos estados se etiquetan $1, 2, \dots, M$. La variable aleatoria X_t representa el estado del sistema en el tiempo t , de manera que sus únicos valores posibles son $1, 2, \dots, M$. El sistema se observa en puntos del tiempo dados, etiquetados $t = 0, 1, 2, \dots$. De esta forma, los procesos estocásticos $X_t = X_0, X_1, X_2, \dots$ proporcionan una representación matemática de cómo evoluciona la condición del sistema físico a través del tiempo. Este tipo de procesos se conocen como procesos estocásticos de tiempo discreto con espacio de estado finito.

Un sistema de distribución es un sistema reparable, es decir está en operación y puede fallar, pero al fallar puede ser reparado, dependiendo de la naturaleza del elemento averiado. De esta manera se restablece al estado de operación normal del sistema o parte de la red afectada. Por esto, y por ser un sistema considerado continuo en el tiempo, con estados discretos finitos, la confiabilidad de un sistema de distribución se ajusta muy bien a ser representada mediante un proceso continuo de Markov [3]

De esta manera se puede definir una cadena de Markov usando como P_1 y P_2 la probabilidad de encontrar el elemento en estado de falla o bueno y λ y μ respectivamente, como la tasa de falla y la tasa de reparación como se muestra en la ecuación 1.2.

2.2. Teoría de Colas

La teoría de líneas de espera o teoría de colas se originó en el año de 1909 con los trabajos de A. K. Erlang. Este ingeniero danés inició un estudio de la congestión de tráfico telefónico con el objetivo de cumplir la demanda incierta de servicios en el sistema telefónico de Copenhague [24].

La formación de líneas de espera más conocidas como colas es un fenómeno normal que se presenta cuando la demanda de un servicio en un momento dado es mayor a la capacidad de suministrarlo. En diferentes sectores, es frecuente que se deban tomarse decisiones con respecto a la cantidad y capacidad de proporcionar cierto servicio; sin embargo, generalmente es imposible predecir con exactitud cuándo llegarán los usuarios en busca del servicio y cuánto tiempo será necesario para prestarlo; es por ello que estas son decisiones suelen ser estratégicas. Disponer de demasiado recurso implica costos excesivos y por otro lado, carecer de la capacidad de prestar el servicio suficiente hace que las colas sean más largas de lo esperado en ciertos momentos. Las colas largas también son costosas en términos de cumplimiento de indicadores, costos sociales, pérdida de clientes, etc. La teoría de Colas no resuelve el problema en sí, pero contribuye de una manera importante con información vital sobre el desempeño de la cola y el tiempo medio de espera para la toma de decisiones que contribuyan a lograr un balance económico entre el costo del servicio y el costo asociado con la espera por la prestación de este servicio.

La teoría de colas es el estudio matemático de las colas o líneas de espera dentro de un sistema [25]. Esta teoría caracteriza el sistema de colas de la siguiente manera:

- **Llegadas o entradas al sistema.** Características como el tamaño de la población que puede ser finita o infinita y el patrón de llegada que se consideran aleatorias cuando son independientes entre sí, su ocurrencia no puede ser predica de manera exacta y se denomina promedio de llegadas λ .
- **Línea de espera.** Características de la capacidad de la fila, como si ésta es infinita si el cliente que llega puede esperar para recibir el servicio en caso de que el mecanismo de servicio esté lleno, y la disciplina de la cola que se refiere a la forma en que los clientes reciben el servicio. Las disciplinas que normalmente se asumen son cuatro y reciben sus nombres por sus siglas en inglés. Cuando en el sistema el primer cliente que llega es el primero en ser atendido, decimos que es de tipo FIFO (“First-In-First-Out”) o FCFS (“First-ComeFirst-Served”); si es disciplina LIFO (“Last-In-First-Out”) o LCFS

(“Last-Come-FirstServed”), el último cliente en llegar es el primero en ser atendido; para RSS (“RandomSelection-For-Service”) o SIRO (“Service-In-Random-Order”) se seleccionan a los clientes de manera aleatoria, es decir, cada uno tiene la misma probabilidad de ser atendido; o en el caso de la disciplina PRI (“Priority-Service”), algunos clientes tienen tratamiento especial y la fila es dividida en clases de prioridad de acuerdo al tratamiento preferencial en consideración.

- Mecanismo de servicio. Características del diseño de la prestación del servicio como el número de servidores y la distribución del tiempo del servicio que para el caso en estudio se define como exponencial debido a la propiedad de Markov.

El proceso básico supuesto por la mayor parte de los modelos de colas y adaptado al problema abordado en este trabajo es el siguiente. Los clientes que presentan fallas del servicio y que requieren un servicio constituyen la población de clientes que entran aleatoriamente al sistema de acuerdo con una distribución exponencial y forman una o varias colas para ser atendidos, en dado caso que las cuadrillas estén ocupadas. En determinado momento se selecciona un cliente de la cola sin servicio, para proporcionarle restablecerlo, mediante alguna regla conocida como disciplina de servicio que para simplicidad generalmente es de la forma FIFO; sin embargo, en la práctica la selección más eficiente está dada en términos de la distancia entre el cliente y la cuadrilla más cercana. Después de una intervención técnica de restablecimiento del servicio, el cliente sale del sistema de colas. En la figura **1.10** de la sección de estado del arte, se muestra un sistema de colas con n cuadrillas ocupadas y n clientes haciendo cola en la espera del restablecimiento del servicio y en este caso la totalidad de los clientes serán atendidos.

2.3. Clasificación de las fallas de acuerdo con su naturaleza

La Ingeniería de la confiabilidad se compone de la presentación metódica de técnicas y principios adaptados a la prestación del servicio. El propósito es mejorar la confiabilidad intrínseca de un proceso, producto o servicio e identificar los puntos potenciales de mejora [26]. En la práctica no todas las averías se pueden erradicar y por ello otro se hace necesario determinar los actos idóneos como la clasificación de aquellos fallos que son inevitables y la determinación de una estrategia clara para paliar las consecuencias.

La manera más eficiente de mejorar la calidad del servicio reduciendo los tiempos de reparación de fallos es contar con un adecuado registro de información y la construcción de bases de datos de fallas que permita establecer sus causas, la adecuada medición de los tiempos de atención y los recursos destinados para hacerlo. En [19] se presenta una adecuada clasificación que permite segmentar las fallas y configurar una base de datos adecuada. En la clasificación, los principales factores de clasificación presentados obedecen a la naturaleza misma de la falla, a las causas de la salida de los circuitos y a las características propias de los fallos.

- Según el grado de influencia en la capacidad de trabajo; falla total, parcial o incompleta
- Según el carácter físico de la aparición; catastróficos o por cambios en los parámetros mecánicos, electrónicos o desgaste natural, dependientes o independientes.
- Según el carácter del proceso de aparición; repentino, gradual o progresivo.
- Según el tiempo de existencia del fallo; estables, temporales o intermitentes.
- Según el momento de aparición del fallo; aleatorios, infantiles, por desgaste.
- Según la información del fallo; activo o pasivo.
- De acuerdo con el contexto de recolección de datos de fallo; fallas primarias, fallas secundarias de causa común, causa propagada o por error humano.

2.3.1. Clasificación de causas de salidas de líneas y redes eléctricas

La clasificación de las causas permite el análisis de la información en busca de las razones fundamentales que se derivan en las fallas que afectan el servicio y permite el direccionamiento de planes estratégicos en busca de la mitigación de los motivos o causas raíz que afectan la continuidad del servicio. Algunas de las principales causas de los fallos son las siguientes:

- Por el estado del tiempo; ventisca, nieve, frío extremo, inundaciones, calor extremo, huracanes, tornados, hielo, descargas atmosféricas, lluvia, vientos fuertes, etc.
- Misceláneos; aeronaves, animales, vehículos, hundimientos, fuego, explosión, sabotaje, vandalismo, árboles, terremotos, etc.

- Por componentes del sistema; suministro de combustible, fallas en generadores, transformadores, equipos de interrupción, conductores, accesorios de postes, torres, aislamientos de líneas, subestaciones, equipo de control de tensión, equipo de protección, medida y control.
- Por condiciones del sistema; inestabilidad, voltajes altos y bajos, frecuencia alta o baja, sobrecargas, sistemas eléctricos vecinos, etc.
- Personal de la empresa de energía; por errores de operación del sistema y errores de mantenimiento

2.3.2. Caracterización de los fallos

La caracterización de los fallos permite un dimensionamiento específico de la causalidad y consecuencias de los fallos que se presentan en la red de distribución en estudio con el objetivo de valorar el estado y evaluar el nivel de criticidad de los fallos que se presentan para determinar la robustez del recurso operativo que se requiere para las reparaciones.

- Causas; errores de diseño, especificaciones incorrectas, desgaste natural, errores de implementación, componentes defectuosos, perturbaciones externas, fallos en los componentes, errores en el dimensionamiento de componentes.
- Naturaleza; especifica la parte del sistema (software, hardware análogo o digital)
- Duración; permanentes, intermitentes o transitorios
- Extensión; local, global
- Variabilidad; determinados o indeterminados

2.4. Gestión de las habilidades del personal

Cuando se habla de la prestación del servicio de energía eléctrica en sistemas de distribución, generalmente se piensa en conductores, activos de la red, equipos tecnológicos, operación del sistema, gestión comercial; sin embargo, es relevante resaltar que el factor más importante son las personas, porque son seres humanos quienes finalmente van a ejecutar las actividades de reparación de las fallas. Es por este motivo que la gestión del rendimiento toma gran relevancia cuando se pretende mejorar la calidad del servicio porque de nada sirve contar con toda una infraestructura física y tecnológica, si el personal encargado de operarla

no cuenta con las habilidades y el empoderamiento necesario para hacerlo.

De la misma manera que se maneja el desarrollo de habilidades técnicas en los deportes, es necesario determinar con precisión el ámbito del entrenamiento para lograr el desarrollo multilateral de los integrantes de las cuadrillas considerando los factores técnicos, factores tácticos, aspectos psicológicos, cohesión del equipo de trabajo, factores de salud, prevención de lesiones, conocimientos teóricos y práctico [27].

La gestión del desempeño es un proceso continuo que se actualiza constantemente a medida que se desarrolla el desempeño mismo [28], especialmente cuando los eventos clave crean oportunidades para demostrar experiencia y contribuir a las metas planteadas y además abarca temas tan importantes como:

- La relevancia de la gestión del desempeño.
- Evaluación del desempeño.
- Herramientas adecuadas de medición.
- Establecimiento de metas.
- Retroalimentación.
- Gestión del aprendizaje individual y en equipo.
- Coaching.
- Gestión del agotamiento.

El desempeño de los trabajadores se obtiene al cumplir con la carga de trabajo que se les asigna de acuerdo con su capacidad, experiencia, seriedad y habilidades; así mismo, el desempeño de la organización está influenciado por diferentes factores como la motivación laboral, la capacitación, las recompensas etc. [29]. Por ello es necesario establecer un mecanismo de medición del desempeño acompañado de un esquema de incentivos y retroalimentación constante ya que cuanto más se intensifique la formación, el entrenamiento y las recompensas del personal, más alto será su nivel de compromiso en la búsqueda del objetivo, conociendo que, *si se satisfacen las necesidades psicológicas innatas de competencia, relación y autonomía de los individuos, es probable que se logre un funcionamiento y un crecimiento óptimos.* [30].

La optimización de los tiempos de atención de las fallas se encuentra directamente relacionado a la habilidad de las cuadrillas de resolver las fallas que se presenten y por ello es

de vital importancia evaluar con detenimiento la velocidad de cada una de sus actuaciones, no con el objetivo de tener cuadrillas especializadas en ciertos tipos de fallas; sino, por el contrario, con el objetivo de identificar las desviaciones y desplegar un plan de formación y entrenamiento específico que lleve a la totalidad del personal a alcanzar los niveles deseados de tiempos de resolución de las fallas asegurando sobre todo la integridad física.

Capítulo 3

Metodología y caso de estudio

Para abordar este problema y definir una metodología clara que conduzca a alcanzar los objetivos de optimizar los tiempos de atención de fallas del servicio de energía eléctrica en sistemas de distribución local, se analiza con detenimiento cada parte del problema como un fenómeno independiente para la toma de decisiones y se propone el mapa de proceso presentado en la figura 3.1 para la toma de decisiones acertadas y seguras para el siguiente paso.

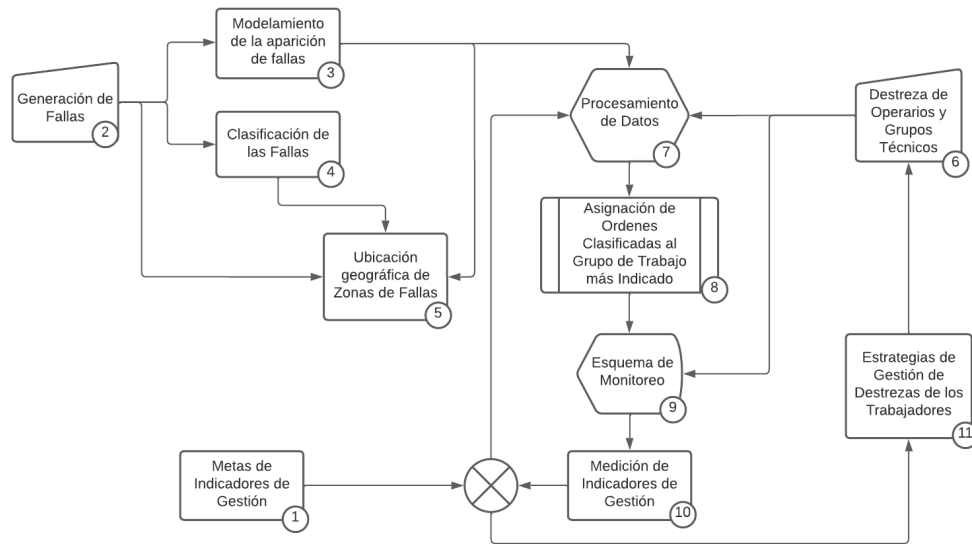


Figura 3.1: Mapa de Procesos

Como datos de entrada (1) se toma como referencia los indicadores intermedios definidos por el OR para la medida de los tiempos de reparación que conducen al cumplimiento de los indicadores regulatorios y sirven dentro de la metodología para retroalimentar el procesamiento de datos para la asignación eficiente de órdenes a cada grupo de trabajo.

En segunda medida (2) se aborda el fenómeno de aparición de las fallas como un proceso aleatorio y se propone una alternativa de predicción (3) del comportamiento de la volumetría de las fallas en las horas siguientes con el objetivo de contar con información oportuna para determinar el número de cuadrillas necesario en las horas subsiguientes y prever si se requiere o no reforzar el recurso operativo destinado para atender la cola de fallas dentro de los tiempos establecidos como promesa de valor.

Como parametrización del modelo, se establece una clasificación de las fallas (4) para determinar el equipamiento necesario que debe llevar cada cuadrilla de acuerdo con sus habilidades y el tipo de fallas objetivo y se ubica geográficamente de acuerdo con el comportamiento histórico para sugerir la ubicación estratégica de las cuadrillas (5) de tal forma que se logren optimizar los tiempos de desplazamiento de las cuadrillas hasta el lugar de la falla.

Por otro lado, se propone un método de medición de rendimiento de las cuadrillas (6) en términos de tiempos de atención de cada tipo de falla con el objetivo de direccionarlas a la cuadrilla con mejor rendimiento y adicionalmente contar con información oportuna para apalancar el plan de formación del personal enfocado en las aristas específicas que conduzcan a contar cada vez con más personal disponible que pueda recibir asignación de cualquier tipo de falla.

La información de la predicción de la volumetría de las fallas, la clasificación de las mismas, la ubicación de las cuadrillas y sus destrezas, se procesan (7) y se toma de decisión de asignar las ordenes de trabajo a la cuadrilla más apropiada y deberá contar con un esquema de monitoreo constante para decidir el ajuste de la capacidad operativa para atender las fallas que según el modelo de predicción se van a presentar en las próximas horas y lograr así el objetivo fundamental que es la optimización de los tiempos de atención.

La información utilizada para el desarrollo de este caso de estudio fue suministrada por la empresa PROING SA, y fue recopilada en tiempo real durante la prestación del servicio de atención de emergencias en la zona norte de la ciudad de Bogotá desde agosto de 2016 hasta diciembre 2021 cuando se consolidó para el procesamiento final de los datos aquí presentados.

Finalmente, se propone un proceso metodológico que conduzca a optimizar los tiempos de atención de fallas en redes de distribución gestionando los centroides de concentración de fallas y las destrezas de los operarios y los grupos técnicos, alineado con la naturaleza de las fallas. Para el análisis de la volumetría de las fallas se excluyeron los datos de los años 2020 y 2021 por considerarse afectados por la pandemia COVID-19, por haber causado una

disminución importante en la demanda de energía y por consiguiente una afectación a los resultados esperados del modelo desarrollado.

Los datos analizados corresponden a un total de 47.068 fallas atendidas y la metodología propuesta para abordar el caso de estudio planteado consiste en abordar el problema segmentando cada proceso de una manera lógica, identificando las entradas y salidas de cada uno caracterizadas con las respectivas simulaciones o ejemplos particulares construidos bajo la luz de la información disponibles y supuestos declarados. En la figura 3.1 se presenta el mapa de proceso utilizado para el desarrollo del caso de estudio.

3.1. Metas de Indicadores de Gestión

Como se describió en la definición del problema, el asunto a resolver es el mejoramiento de los indicadores de calidad en la prestación del servicio. Para ello la CREG estableció como indicadores principales el SAIDI y SAIFI que miden la continuidad del servicio. En cumplimiento de estos indicadores los diferentes operadores de red han definido indicadores intermedios que miden la eficiencia de los grupos de trabajo en el restablecimiento del servicio de manera oportuna y que aseguran el cumplimiento de los indicadores regulatorios. En el marco del desarrollo de este trabajo, los principales indicadores definidos por el Operador de Red son la oportunidad en la atención de fallas en clientes masivos (AEM), la oportunidad de atención de fallas de Mayor Impacto (AMI) y el tiempo de llegada al primer punto indicado por Centro de Control (1_punto) definiendo tiempos en relación con la volumetría de usuarios atendidos y las metas regulatorias.

El indicador de oportunidad de atención de fallas clientes masivos AEM se define en la ecuación 3.1.

$$AEM = \frac{\text{Numero de Ordenes Ejecutadas en Clientes Masivos } \leq 2 : 30 \text{ horas}}{\text{Numero Total de Ordenes Ejecutadas en Clientes Masivos Por Mes}} * 100 \quad (3.1)$$

Con este indicador se mide el porcentaje fallas resueltas en clientes masivos en un tiempo menor o igual a 2:30 horas dentro de un mes de ejecución; donde se define como Clientes Masivos a los clientes hogares y pequeño comercio cuyas fallas son generalmente en Baja Tensión.

El indicador de oportunidad en la Atención de Fallas de Mayor Impacto, se define como se indica en la ecuación 3.2.

$$AMI = \frac{\text{Numero de Ordenes Ejecutadas de Mayor Impacto } \leq 7 : 00 \text{ horas}}{\text{Numero Total de Ordenes Ejecutadas de Mayor Impacto Por Mes}} * 100 \quad (3.2)$$

Con este indicador se mide el porcentaje de fallas de mayor impacto resueltas en un tiempo menor o igual a 7 horas durante el mes de ejecución. Donde se definen las fallas de mayor impacto a aquellas que afectan la prestación del servicio a un gran número de clientes y cuya reparación requiere equipamiento especial como carros canasta, grúas, equipos de identificación de fallas, equipos de pruebas VLF y que generalmente se presentan en Media Tensión.

Como las fallas de media tensión generalmente afectan a un número importante de clientes y son de resolución operativamente compleja, es muy importante resolverlas en el menor tiempo posible para minimizar el impacto en el SAIDI. Para ello y considerando la problemática adicional de distancias y movilidad que se presenta en la ciudad de Bogotá donde se desarrolla este caso de estudio, es estratégico que las cuadrillas lleguen muy rápido al primer punto de falla identificado por el centro de control. Por esta razón se define el indicador de tiempo de llegada que se presenta en la ecuación 3.3.

$$1_punto = \frac{\text{Numero de Llegadas } \leq 30 \text{ minutos}}{\text{Numero Total de Solicitudes de Centro de Control Por Mes}} * 100 \quad (3.3)$$

Es importante resaltar que estos indicadores son definidos particularmente por cada operador de red de acuerdo a la naturaleza, concentración de usuarios y compromisos regulatorios.

3.2. Análisis de la volumetría de las fallas

En el análisis de la volumetría de la aparición de las fallas en el caso de estudio, se utilizó la información suministrada por la Empresa PROING SA en el desarrollo de la atención de fallas en la zona norte de Bogotá durante los años 2016, 2017, 2018 y 2019. Se omitieron los datos del año 2020 en adelante por tener una afectación importante debido a la pandemia COVID-19.

Después de depurar los datos inconsistentes, se analizaron 47.068 fallas de las cuales 4.708 son de media tensión y 42.360 de baja tensión. Se clasificaron por mes, día y hora de aparición y posteriormente se calculó el promedio de fallas obteniendo el resultado presentado en la tabla **3.1**

A pesar de que el fenómeno de aparición de fallas es aleatorio, este se ve influenciado por el uso de la red y es por ello que durante ciertos periodos del día se puede observar un volumen de fallas mayor que en otros. En general en las noches hay un valle en la dinámica de aparición de fallas y durante el día que es donde hay mayor uso, se presentan así mismo un mayor volumen de fallas.

Tabla 3.1: Promedio de Aparición de Fallas por Día y por Hora

Hora Asignación	domingo	lunes	martes	miércoles	jueves	viernes	sábado
12:00	2,233	1,783	2,453	1,944	2,037	2,111	2,014
1:00	1,769	1,526	1,985	2,051	1,823	2,397	1,918
2:00	1,833	1,69	1,891	1,833	2	1,897	1,818
3:00	1,488	1,368	1,909	1,717	1,46	1,828	1,698
4:00	1,375	1,379	1,794	1,404	1,421	1,425	1,5
5:00	1,313	1,2	1,24	1,515	1,44	1,393	1,154
6:00	1,609	1,989	2,078	2,368	2,234	2,179	2,5
7:00	1,706	2,6	3,142	2,703	2,948	2,714	2,467
8:00	2,01	3,357	3,807	3,661	3,975	3,615	3,598
9:00	2,065	3,695	4,119	3,686	3,808	3,623	3,628
10:00	2,229	4,097	4,554	4,107	4,35	4,341	3,57
11:00	2,222	3,905	4,467	4,22	4,3	3,821	3,622
12:00	1,897	3,523	3,893	3,538	3,402	3,521	3,106
13:00	1,859	2,961	3,173	3,088	3,123	3,107	2,566
14:00	2,379	4,766	4,713	4,807	4,617	4,484	4,431
15:00	2,192	4,157	4,223	4,405	4,319	3,941	3,259
16:00	1,99	3,853	3,759	3,726	4,137	3,65	3,252
17:00	1,654	3,433	3,495	3,307	3,4	3,287	2,8
18:00	2,051	3,476	3,15	3,523	3,259	2,964	2,596
19:00	2	3,019	3,153	3,139	3,252	2,963	2,426
20:00	1,667	2,772	3,171	2,738	2,858	2,854	2,239
21:00	1,439	1,899	2,026	1,97	1,949	2,028	1,71
22:00	2,207	2,815	2,584	2,83	2,768	2,652	2,267
23:00	1,633	2,425	2,264	2,152	2,159	2,256	2,049

Al graficar estos datos se puede observar en la figura **3.2** que a las 13:00 y 16:00 horas se presenta la mayor volumetría de fallas con un bache entre las 14:00 y 15:00 horas. Así mismo se observa que en la noche aparecen pocas fallas. Adicionalmente se observa que los días miércoles y domingo son los días con mayor y menor cantidad de fallas respectivamente.

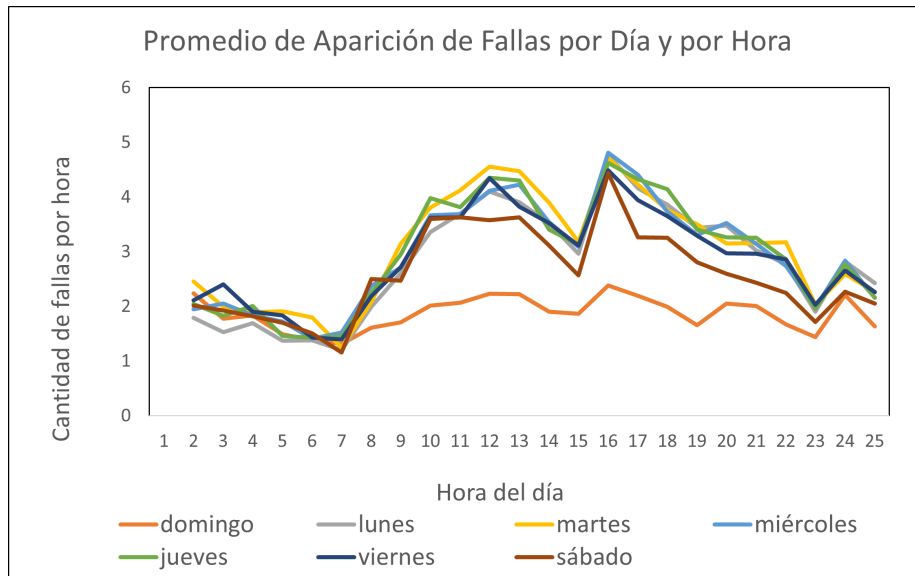


Figura 3.2: Promedio de Aparición de Fallas por Día por Hora

Para el dimensionamiento de la capacidad operativa en cada horario del día se puede aplicar el modelo presentado en [2] aplicando la teoría de colas obteniendo una cantidad eficiente de cuadrillas necesarias en cada horario del día optimizando los costos.

Sin embargo, como la aparición de las fallas es aleatoria, se hace necesario predecir el comportamiento de cada día para ajustar de manera dinámica la capacidad operativa aplicando diferentes estrategias como alargar turnos de trabajo, adelantar turnos o con apoyos de recurso operativo adicional si fuera necesario. De cualquier forma, es necesario contar con información probabilística previa que oriente la disposición del recurso y la toma de decisiones oportunas y por ello cobra relevancia el modelo de predicción del volumen de fallas que se presenta en el siguiente apartado.

3.3. Modelo de predicción del volumen de fallas

Es claro que la aparición de las fallas es a causa del uso mismo de la red y múltiples factores externos que interactúan con ella haciendo que estas sean completamente impredecibles en cuanto a su ubicación y frecuencia; sin embargo, analizando los datos se pueden observar patrones de comportamiento que se puede segmentar de acuerdo con mes de ocurrencia, el día de la semana y la hora como se presenta a continuación.

La figura 3.3 muestra que existe una clara tendencia a las 14:00 horas en los meses de

Hora Falla	Dia de Semana	MES											
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
14:00	Domingo	2,8	2,2	3,0	2,5	2,4	1,8	2,8	2,3	2,2	2,2	2,2	2,2
	Lunes	4,9	5,7	4,5	6,1	5,3	4,3	5,0	4,5	5,4	3,5	3,4	5,5
	Martes	4,9	4,4	5,9	7,9	6,1	5,0	4,8	4,3	4,6	3,8	3,8	3,3
	Miercoles	5,1	4,4	6,8	5,0	4,5	5,8	5,2	4,7	5,7	4,2	4,1	3,6
	Jueves	6,1	5,1	5,8	3,9	3,7	5,3	4,5	4,3	5,0	3,8	4,0	4,5
	Viernes	4,0	5,1	4,7	4,5	5,3	5,6	5,0	4,3	4,3	2,8	4,7	4,3
	Sabado	6,4	4,3	5,3	5,3	5,3	4,3	4,3	4,5	4,5	3,4	2,7	4,2
Total 14:00		4,9	4,5	5,1	5,1	4,8	4,7	4,4	4,2	4,6	3,4	3,6	4,0
21:00	Domingo	1,3	1,7	1,3	1,0	1,3	1,4	1,5	1,4	1,2	1,7	1,5	1,6
	Lunes	1,1	1,5	1,6	1,6	2,4	1,0	1,6	1,1	2,0	2,2	2,1	3,3
	Martes	1,4	1,5	4,0	1,0	2,0	2,2	1,3	1,6	1,7	2,6	2,8	2,1
	Miercoles	1,8	2,7	2,4	1,5	1,2	1,3	1,3	1,0	2,2	1,9	2,4	3,4
	Jueves	1,5	1,3	1,7	1,8	2,5	1,0	1,5	1,3	1,7	2,3	2,4	2,4
	Viernes	1,0	1,4	2,0	2,0	2,3	2,0	1,0	1,6	1,9	3,3	2,9	1,7
	Sabado	1,5	1,5	1,6	1,8	1,5	2,0	1,0	1,4	1,4	1,3	3,0	1,9
Total 21:00		1,4	1,7	1,9	1,6	1,9	1,6	1,3	1,4	1,7	2,2	2,4	2,3

Figura 3.3: Fallas por día, por hora y por mes

marzo, abril y mayo donde aparecen relativamente más fallas que en los meses de octubre, noviembre y diciembre. De igual forma se observa una tendencia contraria a las 21:00 horas donde la mayor cantidad relativa de fallas se presenta en los meses de octubre, noviembre y diciembre.

Así mismo en la figura 3.4 se puede apreciar como varía la cantidad de fallas a diferentes horas del día, evidenciando que mientras a las 14:00 horas durante los últimos meses del año se reduce el volumen de fallas, a las 21:00 horas sucede lo contrario.

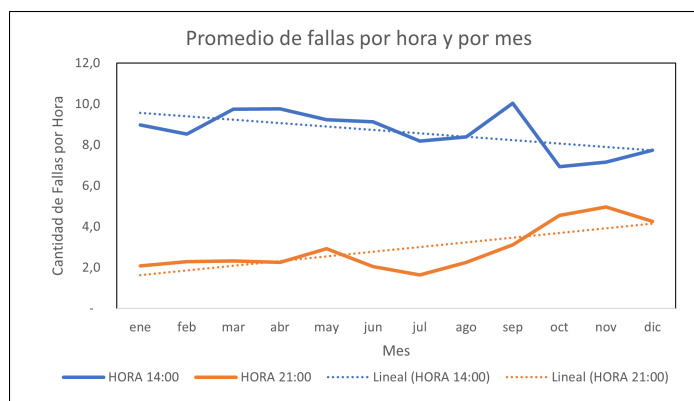


Figura 3.4: Fallas por hora, por mes

Contando con esta información, es viable dinamizar los turnos de trabajo durante los diferentes meses de año ubicando la mayor capacidad operativa en los horarios que así lo requieren ya que en los últimos meses del año se requieren menos cuadrillas atendiendo fallas a las 14:00 horas y por el contrario, a las 21:00 horas se requieren más.

También se puede observar en la figura 3.5 un comportamiento diferencial entre días de la semana en relación con los meses. En otras palabras, no es lo mismo un jueves de enero que un jueves de julio; por lo tanto, el dimensionamiento operativo y los turnos de trabajo de las cuadrillas también deben ajustarse a la necesidad para contar con la capacidad operativa adecuada durante los diferentes días de la semana.

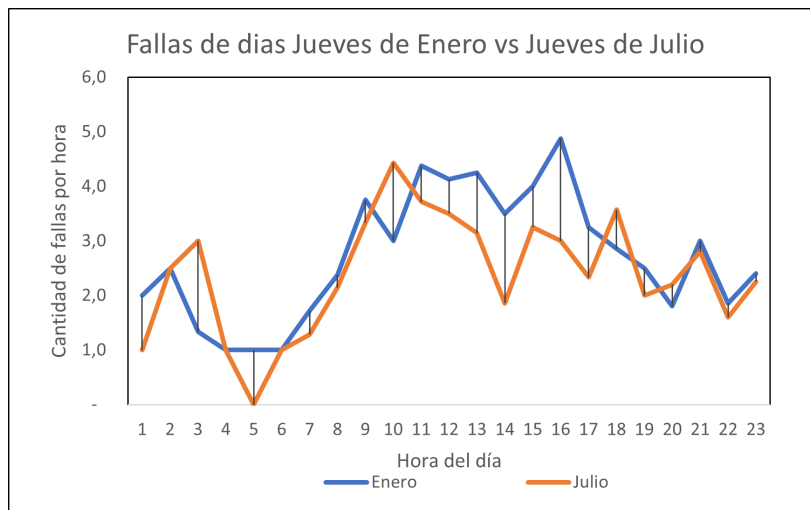


Figura 3.5: jueves julio vs jueves enero

Con base en estas evidencias, se plantea que el comportamiento de la volumetría de las fallas tiene una dinámica compleja cuyas características están dadas por lo menos por la hora, el día de la semana y el mes de ocurrencia; además de otros factores que, aunque no se incluyeron en este estudio de caso, perfectamente se podrían incluir en el modelo tales como días festivos o fechas importantes que cambie la dinámica del uso del servicio de energía.

3.3.1. Cadenas de Markov

Considerando la complejidad de la aparición de las fallas y conociendo que el comportamiento es diferente entre meses, días de la semana y horas del día; para el dimensionamiento

del recurso operativo que se requiere para atender las fallas que se esperan recibir, es necesario definir una línea basal y prever si en las horas subsiguientes el volumen de fallas va a ser menor, similar, más alto o mucho más alto que el promedio histórico.

Contando la información histórica, promedios calculados previamente y conociendo que el volumen de fallas no es siempre igual al promedio, sino que como observamos con anterioridad, este varía con día, el mes, la hora y adicionalmente es claro que también depende de las condiciones de uso de la red como cargabilidad, condiciones atmosféricas entre otros; por esto es importante considerar el estado presente en que se esté haciendo el análisis.

Por esta razón se definen los posibles estados en que se puede encontrar el volumen de fallas en cada hora y los posibles cambios que se pueden presentar como se presenta en la tabla 3.2 y la figura 3.6. El objetivo principal de la cadena de Markov es predecir de manera probabilística si la cantidad de fallas en las horas siguientes a la actual van a ser menores, mayores o similares a la línea base de promedio calculado previamente. Por ellos se definen los estados de la cadena de la siguiente manera:

Tabla 3.2: Estados de Markov

Estados de Markov	Límite Inferior	Limite Superior
Bajo	0	0,75
Normal	0,75	1,25
Alto	1,25	2
Exceso	2	3

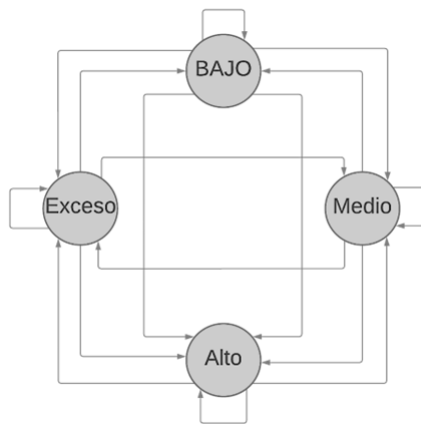


Figura 3.6: Estados de Markov

De acuerdo con estos parámetros se realiza el conteo estocástico de los eventos de cambios de estado en cada hora comparados con la hora siguiente según el día y el mes de ocurrencia. En la tabla **3.3** se presenta un extracto de la consulta de la base de datos que cuenta el número de eventos.

Tabla 3.3: Extracto de tabla de cambios de estados históricos

mes	día	Hora _i	Estado _i	Hora _f	Estado _f	Eventos
agosto	miércoles	11	alto	12	alto	1
agosto	miércoles	11	alto	12	bajo	1
agosto	miércoles	11	alto	12	medio	1
agosto	miércoles	11	bajo	12	bajo	3
agosto	miércoles	11	bajo	12	medio	3
agosto	miércoles	11	medio	12	alto	1
agosto	miércoles	11	medio	12	bajo	1
agosto	miércoles	11	medio	12	medio	2
agosto	miércoles	12	alto	13	medio	2
agosto	miércoles	12	bajo	13	alto	1
agosto	miércoles	12	bajo	13	bajo	3
agosto	miércoles	12	bajo	13	medio	1
agosto	miércoles	12	medio	13	alto	3
agosto	miércoles	12	medio	13	medio	3
agosto	miércoles	13	alto	14	alto	1
agosto	miércoles	13	alto	14	bajo	3
agosto	miércoles	13	alto	14	medio	1
agosto	miércoles	13	bajo	14	alto	1
agosto	miércoles	13	bajo	14	bajo	2
agosto	miércoles	13	medio	14	alto	1
agosto	miércoles	13	medio	14	bajo	2
agosto	miércoles	13	medio	14	medio	2

Utilizando esta metodología, se calcula la probabilidad de ocurrencia de cada estado futuro partiendo del estado actual en términos de fecha, la hora y la cantidad de fallas actuales y se selecciona como escenario más probable aquel que cuente con la probabilidad más alta de ocurrencia como se muestra en la figura **3.7**.

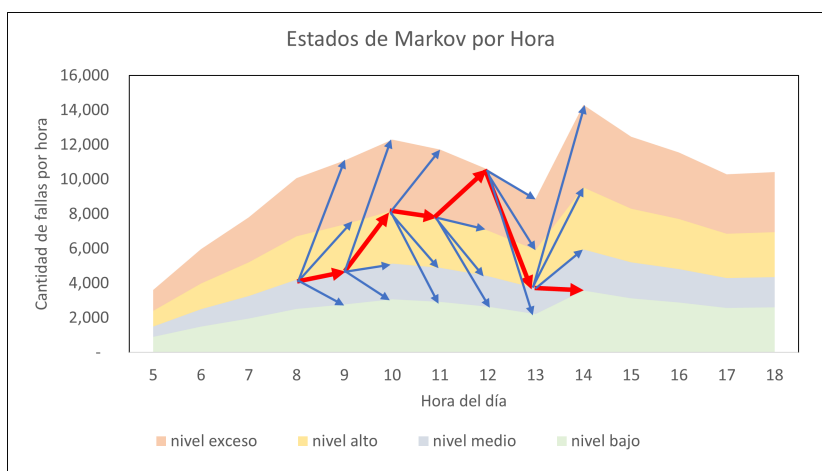


Figura 3.7: Estados de Markov por Hora, predicción

Como prueba de consistencia del modelo, se ingresan datos reales tomando como ejemplo el día lunes 13 de septiembre de 2021 a las 8:00 am, cuando existían 3 fallas y el promedio histórico es de 3.35 fallas, es decir que el nivel de asignación es de 0.89 que corresponde al nivel de Markov “Normal”. Aplicando el modelo de predicción, se obtienen los estados futuros de las horas siguientes como se presenta en la tabla 3.4.

Tabla 3.4: Predicción de Estados

Hora	Estado	Hora	Estado
8:00	MEDIO	20:00	BAJO
9:00	MEDIO	21:00	BAJO
10:00	BAJO	22:00	BAJO
11:00	ALTO	23:00	BAJO
12:00	MEDIO	0:00	BAJO
13:00	BAJO	1:00	BAJO
14:00	MEDIO	2:00	BAJO
15:00	MEDIO	3:00	BAJO
16:00	ALTO	4:00	
17:00	BAJO	5:00	BAJO
18:00	BAJO	6:00	
19:00	BAJO	7:00	

De esta manera se obtiene una predicción como la mostrada en la figura 3.8 del comportamiento de la aparición de fallas en las horas siguientes, teniendo en cuenta que en las horas

donde no aparece valor en la línea de predicción corresponde a escenarios que aún no se han presentado dentro del histórico de datos que se están analizando:

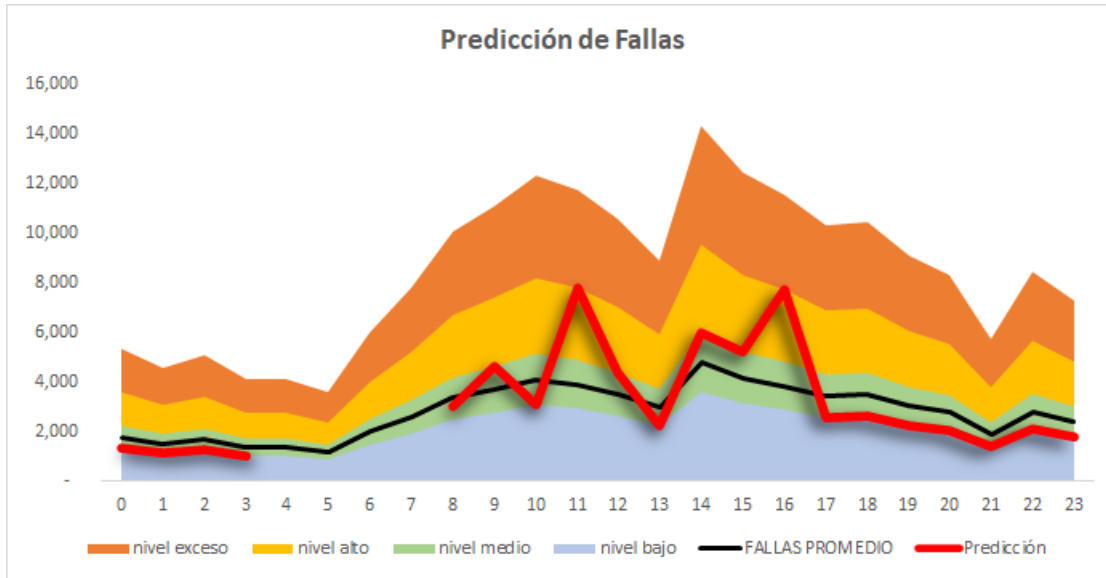


Figura 3.8: Predicción

Contando con este modelo de predicción, se puede prever desde las 8 horas qué a las 11 horas y a las 16 horas del mismo día, lo más probable es que se presenten picos de apariciones de fallas y es posible tomar la decisión oportunamente de reforzar de la capacidad operativa planeada para mantener los tiempos de espera de los clientes dentro de los tiempos esperados.

3.4. Clasificación de las fallas

Se limita el caso de estudio a las fallas presentadas entre el medidor de los usuarios y la cabecera de los circuitos de media tensión. En este sentido se clasificaron las fallas de tal manera que, sea posible definir el tipo de equipamiento que requieren las cuadrillas.

En primera instancia, se contabilizó la cantidad de fallas asociado a los de usuarios afectados y se calculó el porcentaje de incidencia de cada una de ellas como se muestra en la tabla 3.5

Tabla 3.5: Clasificación de fallas por usuarios impactados vs incidencia

USUARIOS IMPACTADOS VS INCIDENCIA		INCIDENCIA				
		70 %	8 %	15 %	3 %	4 %
USUARIOS IMPACTADOS	1 Usuario	X				
	de 1 a 5 Usuarios		X			
	de 1 a 100 Usuarios			X		
	de 1 a 1000 Usuarios			X		
	de 1 a 10000 Usuarios					X

Ahora bien, habiendo definido la cantidad de usuarios afectados en cada falla, se identificó la ubicación más probable del evento dentro de la red como se muestra en la tabla 3.6.

Tabla 3.6: Clasificación de fallas por su ubicación vs usuarios impactados

UBICACIÓN VS USUARIO IMPACTADOS		USUARIOS IMPACTADOS				
		1 Usuario	de 1 a 5 Usuarios	de 1 a 100 Usuarios	de 1 a 1000 Usuarios	de 1 a 10000 Usuarios
UBICACION	Medidor Acometida	X				
	Red de Baja Tensión Transformadores		X			
	Red de Media Tensión Equipos de Media Tensión (Seccionadores, Seccionalizadores)			X		
				X		
					X	

Contando con la ubicación de la falla, es posible determinar el equipamiento requerido por la cuadrilla para realizar la reparación y como se cuenta con el porcentaje de incidencia, es posible planear y dimensionar la capacidad operativa que se requiere para la atención del servicio. En la tabla 3.7 se tabulan los tipos de equipos que se requieren para cada ubicación de falla.

Tabla 3.7: Clasificación de fallas por ubicación vs equipamiento requerido

USUARIOS vs EQUIPAMIENTO REQUERIDO		EQUIPAMIENTO				
		MOTO	EQUIPO LIVIANO	EQUIPO PESADO	GRÚA	CANASTA
UBICACIÓN	Medidor Acometida	X				
	Red de Baja Tensión Transformadores		X			
	Red de Media Tensión Aérea			X		
	Red de Media Tensión Subterránea Equipos de Media Tensión (Seccionadores, Seccionalizadores)		X		X	
					X	

Finalmente, en la tabla 3.8 se presenta un resumen de las posibles causas que pueden esperar las cuadrillas según la ubicación de la falla. Con esta información se definen los equipamientos y las habilidades con que debe contar los grupos operativos para estar en la capacidad de resolver las fallas de manera segura y confiable.

Tabla 3.8: Clasificación de causas por su ubicación

NATURALEZA DE LAS FALLAS		UBICACIÓN					
		Medidor	Acometida	Red de Baja Tensión	Transformadores	Red de media Tensión	Equipos de Media Tensión (Seccionadores, Seccionalizadores)
CAUSA	Fin de la vida útil del elemento	X	X	X	X	X	X
	Deterioro del elemento	X	X	X	X	X	X
	Condiciones Naturales (Lluvia, ventizcas, inundaciones, temblores, etc)		X	X	X	X	X
	Manipulación de terceros	X	X	X	X	X	X
	Manipulación de operarios de la ESP	X	X	X	X	X	X
	Operaciones de Centro de Control					X	X

3.5. Ubicación de Zonas de Fallas

Como sabemos, el fenómeno de aparición de las fallas es aleatorio; sin embargo, también sabemos que las causas dependen en gran medida de la cargabilidad de los circuitos, la vida útil de los equipos y las redes así como el uso que se le dé al servicio de la energía y estos factores están correlacionados con los sectores económicos, la vegetación, la topología de la red, entre otros y estos factores suelen presentarse de manera concentrada en ciertos sectores dentro del área de cobertura de la red de distribución. Por esta razón es posible zonificar las fallas en relación con su ubicación en la red como se presenta a continuación.

3.5.1. Concentración de fallas en los medidores

Las fallas en los medidores suelen concentrarse en sitios donde el parque de medidores instalados es de tecnologías antiguas, en sectores altamente residenciales y por lo general la reparación es simple. El grupo técnico puede estar compuesto por una sola persona que requiere habilidades técnicas suficientes para identificar la falla en la medida, equipamiento liviano y se puede transportar sin dificultad en una moto favoreciendo los tiempos de desplazamiento.

Para este caso, se ubicaron geográficamente la totalidad de las fallas presentadas durante el periodo en estudio y con ayuda del mapa de calor presentado en la figura 3.9 se observa que las fallas asociadas a los medidores tienen su mayor concentración en la zona sur oriente del área en estudio y también se presenta una concentración importante en la zona oriente, más precisamente en la zona aledaña a la calle 85 con Avenida carrera 15 y la carrera 104

con calle 130C respectivamente. Con esta información, se puede concluir que estas son las ubicaciones adecuadas de las cuadrillas con mejor desempeño en la reparación de fallas asociadas a los medidores que de acuerdo con la clasificación, pueden ser cuadrillas en moto.

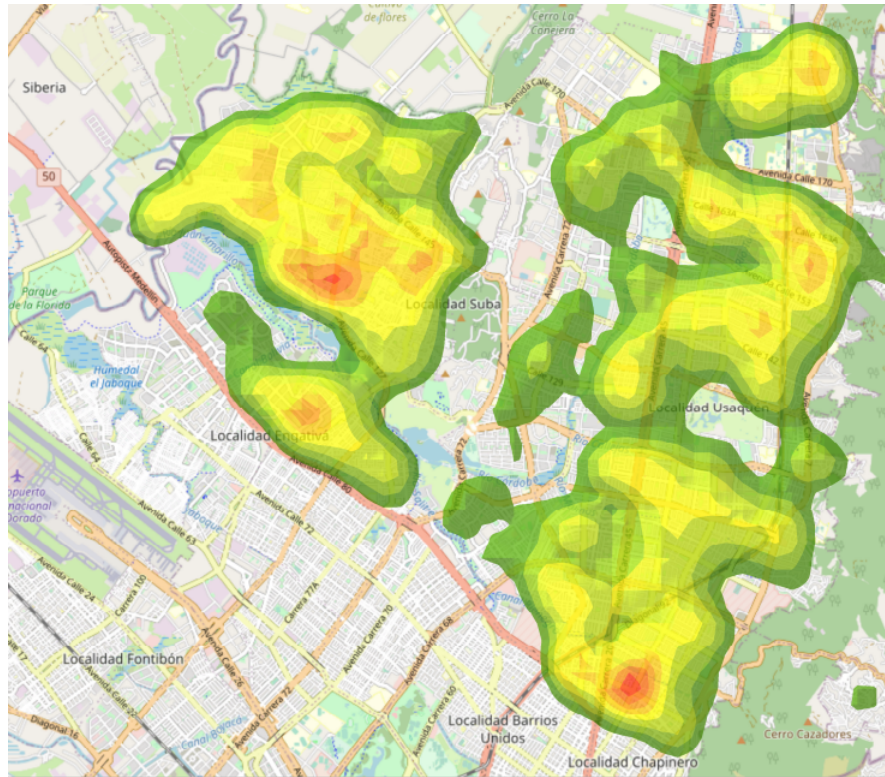


Figura 3.9: Zonificación de fallas en los medidores

3.5.2. Concentración de fallas en las acometidas

Estas fallas suelen concentrarse en zonas de infraestructura antigua o donde hay alta interacción de las acometidas con factores externos como vegetación, tránsito de vehículos o transformaciones urbanísticas y condiciones atmosféricas. Para el caso en estudio, en la gráfica 3.10 se observa que existen dos zonas de concentración importante de fallas en acometidas y la ubicación recomendada para las cuadrillas con mejores habilidades en la resolución de estas fallas son la calle 135 con carrera 156A y la calle 159 con carrera 8.

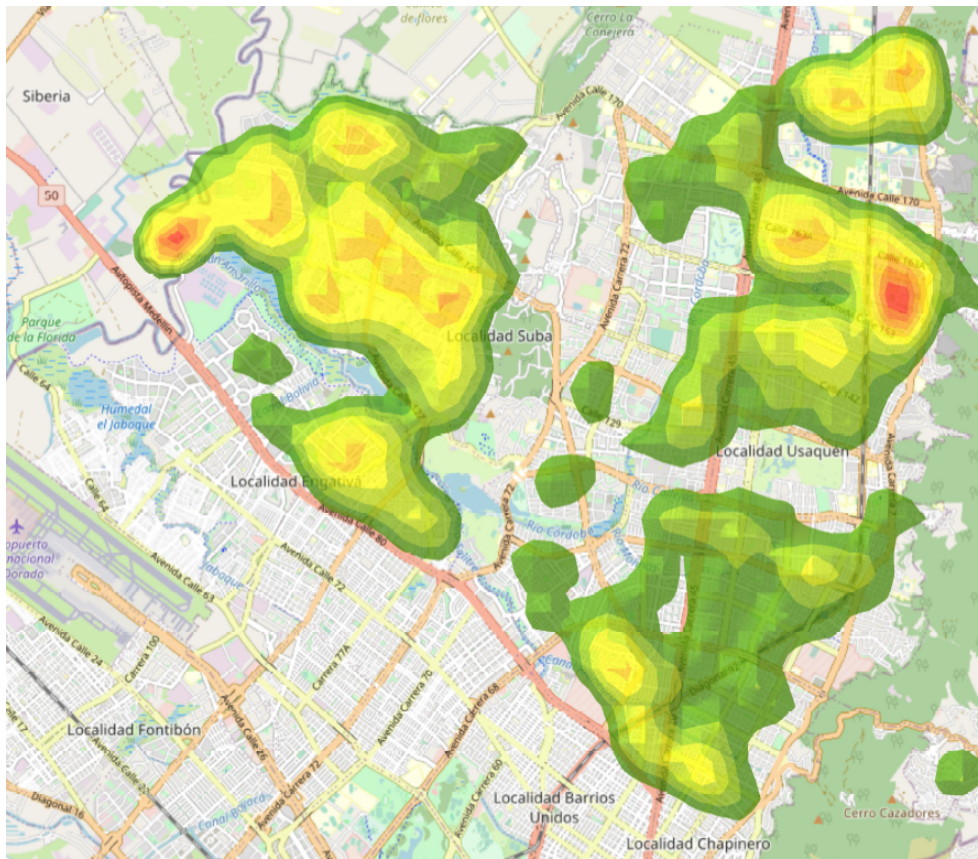


Figura 3.10: Zonificación de fallas en las acometidas

Este tipo de fallas se presentan en redes tanto aéreas como subterráneas, por lo que las actividades a ejecutar en algunos casos requieren entre otros equipos el uso de escaleras y levantamiento de tapas. Por lo tanto, estos grupos de trabajo requieren contar con las habilidades necesarias para el desarrollo de trabajo seguro en alturas, levantamiento seguro de tapas, deben estar compuestos de por lo menos dos personas y con el vehículo apropiado para transportar los equipos.

3.5.3. Concentración de fallas en la red de baja tensión

Estas fallas generalmente se concentran en zonas de crecimiento económico donde se excede la capacidad de los conductores, en sectores de infraestructura antigua, donde hay alta interacción con vegetación, tránsito de vehículos, transformaciones urbanísticas o intervenciones no técnicas por parte de usuarios que pretenden usufructuar el servicio de manera irregular.

Para el caso en estudio, la figura 3.11 muestra que la mayor concentración de fallas en la red de baja tensión se ubica en la zona aledaña a la avenida carrera 15 con avenida calle 85. Por lo tanto, esta sería la mejor ubicación para los grupos de trabajo destinados a estas actividades.

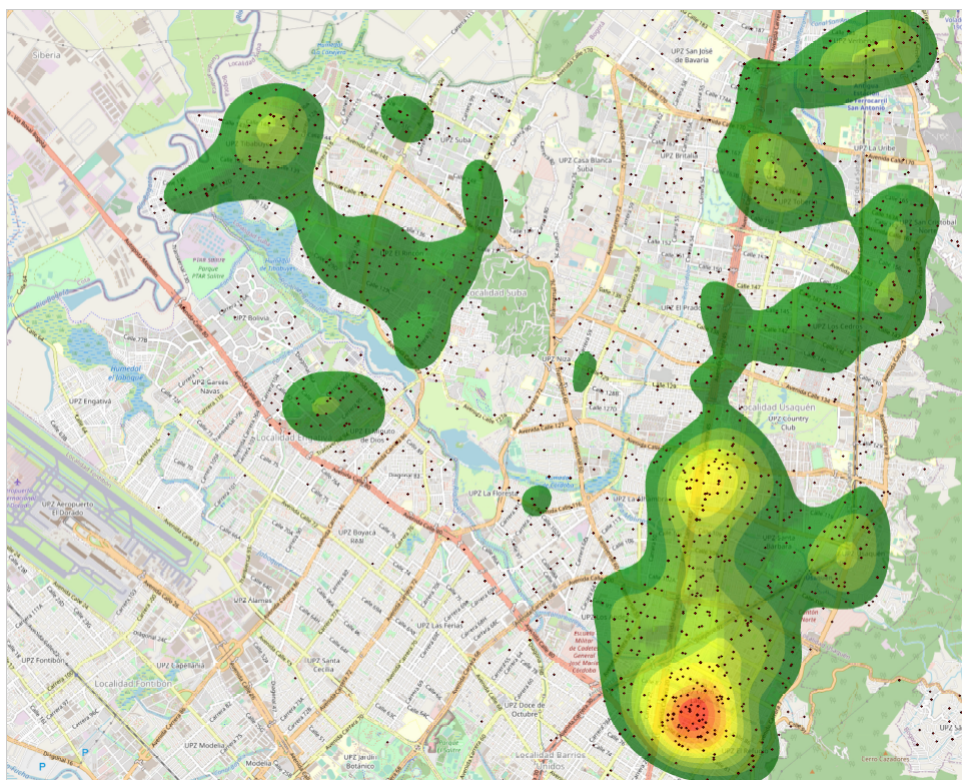


Figura 3.11: Zonificación de fallas en la red de baja tensión

Al igual que las reparaciones de acometidas, estas fallas suelen presentarse tanto en redes aéreas como en redes subterráneas; por lo tanto, los grupos técnicos deben contar entre otras cosas con los equipos necesarios para realizar trabajos seguros en alturas, levantamiento de tapas y el vehículo apropiado para transportar los equipos y una cantidad considerable de cable para reemplazar en los casos en que se requiera.

3.5.4. Concentración de fallas en transformadores

Estas fallas suelen presentarse en sectores de infraestructura antigua o de alto crecimiento donde se supera la capacidad instalada. Para la reparación de este tipo de fallas, es necesario contar con equipamiento pesado como grúas de fuerza que faciliten los trabajos de izaje de cargas en los casos que se requiera y un alto nivel de prelistamiento logístico para contar

con los transformadores de repuesto de manera oportuna.

Además, los grupos técnicos deben contar con el entrenamiento necesario para ejecutar este tipo de trabajo que son generalmente complejos y requieren un alto nivel de entrenamiento para garantizar tanto el menor tiempo de ejecución como la seguridad de los operarios en coordinación con el Centro de Control para determinar la zona segura de trabajo. Los grupos de trabajo deben contar con no menos de 3 personas.

En la figura 3.12 se observa con claridad que la ubicación recomendada para las cuadrillas con la mejor habilidad de reparación de fallas de transformadores es en la zona aledaña a la avenida carrera 15 con avenida calle 85.

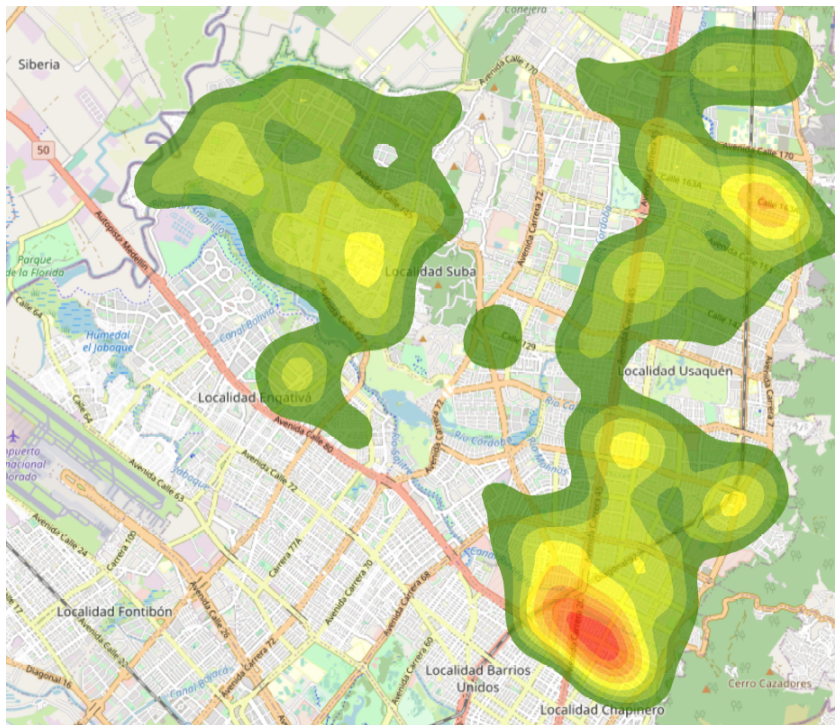


Figura 3.12: Zonificación de fallas en transformadores

En este caso en particular coincide la concentración de fallas en transformadores con las fallas en la red de baja tensión; por lo tanto, es importante desarrollar la habilidad en las cuadrillas de estos 2 tipos de fallas para optimizar los tiempos de atención de estas.

3.5.5. Concentración de fallas en la red de media tensión

Las fallas en redes de media tensión tienen como particularidad que por lo general afectan a una gran cantidad de usuarios y pueden ser tanto en redes aéreas como subterráneas.

En los casos de redes aéreas, generalmente se requiere el uso de equipos pesados como carros canasta para facilitar el acceso a los puntos de falla y en los casos de redes subterráneas se requiere el uso de trazadores, equipos de identificación de fallas, equipos de pruebas VLF y un alto nivel de coordinación con el Centro de Control para garantizar la zona segura de trabajo. Los grupos técnicos deben contar con no menos de 4 personas y apoyos logísticos.

Para el caso en estudios, en la figura 3.13 se observa que el punto de mayor concentración de fallas en la red de media tensión está ubicada en las cercanías de la Avenida carrera 50 con calle 93.

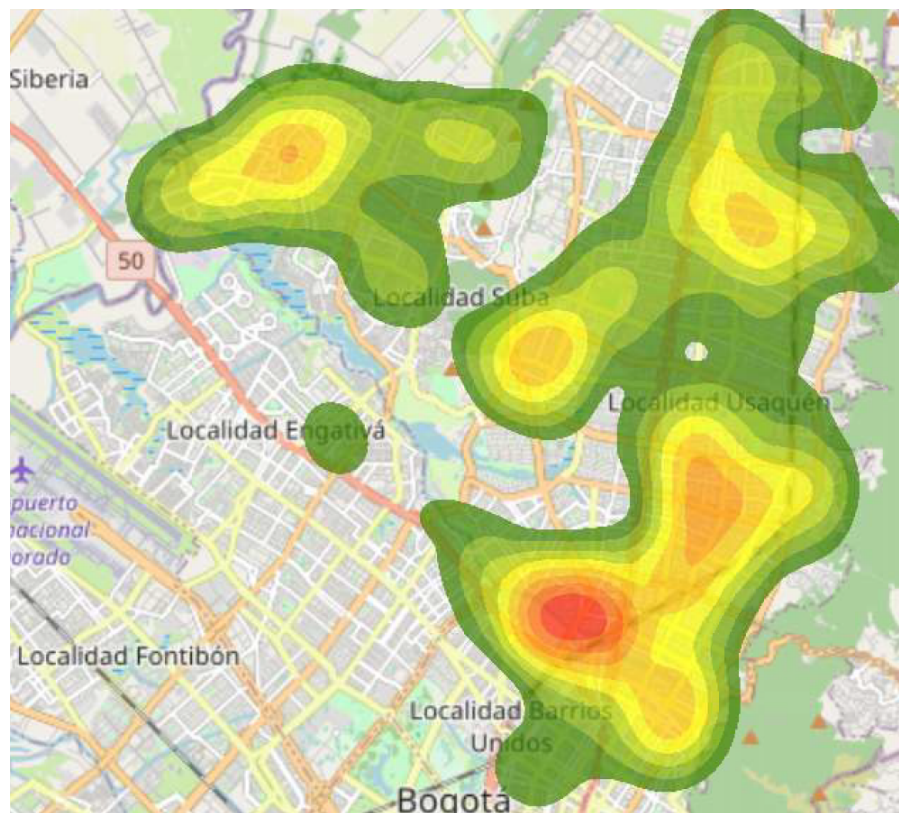


Figura 3.13: Zonificación de fallas en la red de media tensión

Con esta información se puede direccionar asertivamente los grupos de trabajo con las habilidades y equipamientos necesarios incluso antes de la aparición de las fallas, de tal forma

que estén ubicados estratégicamente para llegar rápidamente al sitio adecuado reduciendo los tiempos de desplazamiento.

Así mismo es información de vital importancia para el direccionamiento de los planes de mantenimiento preventivo que conduzcan a reducir la cantidad de afectaciones al servicio planeando intervenciones de manera programada que no impacten en gran medida los indicadores regulatorios de calidad del servicio.

3.6. Modelamiento de las Habilidades

Una vez analizado el fenómeno aleatorio de la aparición de las fallas, después de clasificarlas de acuerdo con su naturaleza, ubicarlas geográficamente; no se puede perder de vista que son seres humanos los encargados de ejecutar las labores de reparación.

Como el principal recurso para alcanzar el objetivo de optimizar los tiempos de atención son las personas, es de vital importancia diseñar una metodología clara y eficiente de formación, entrenamiento y mejora continua que conduzca a mantener al máximo las capacidades técnicas de los grupos de trabajo. En este orden de ideas, en este caso de estudio se propone un esquema de medición de los tiempos de resolución de fallas por parte de los grupos técnicos, con el objetivo de identificar con precisión los aspectos por mejorar de cada uno de ellos y contar con información de valor para direccionar la asignación de trabajos a la cuadrilla más ágil para resolver cada falla de la manera más rápida y segura. Para el caso en estudio se calculó el tiempo medio de reparación de cada tipo de falla asociado a su ubicación en la red, se definió como base de comparación entre todas las cuadrillas y a manera de ejemplo se presentan dos cuadrillas con rendimientos diferentes.

En la forma de presentar los resultados, en la gráfica cada arista indica la ubicación de la falla y entre más alejado está el dato del centro de la gráfica, mayor es el tiempo de reparación. En este orden de ideas la cuadrilla A, presentada en la figura **3.14** tiene rendimientos similares a los esperados y tiempos de resolución de fallas en la red de media tensión muy por debajo del promedio del resto de grupos de trabajo. Por esta razón, ésta sería la cuadrilla seleccionada para atender este tipo de trabajos, mientras que para las fallas en acometidas es mejor seleccionar un grupo técnico que presente mejores resultados.

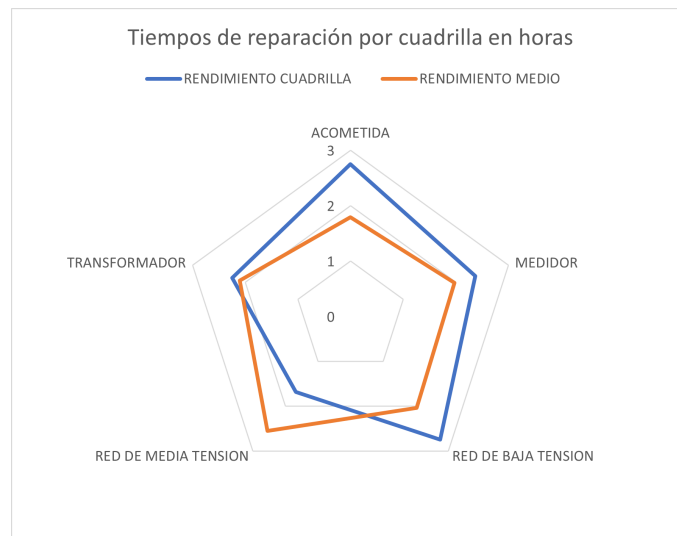


Figura 3.14: Cuadrilla A

Los rendimientos de la cuadrilla B, presentados en la figura 3.15 muestran que este grupo de trabajo tiene rendimientos aceptables para atender las fallas en la medida, en la red de baja tensión, la red de media tensión, pero en las fallas en la acometida sus tiempos de reparación son mayores que el promedio del resto de cuadrillas y en las fallas en transformadores requiere mayor entrenamiento los tiempos de reparación son mucho mayores presentando una desviación importante con respecto a la base de comparación y seguramente es necesario analizar con más detenimiento la causa de sus demoras y alimentar el plan de formación específico para mejorar los rendimientos.

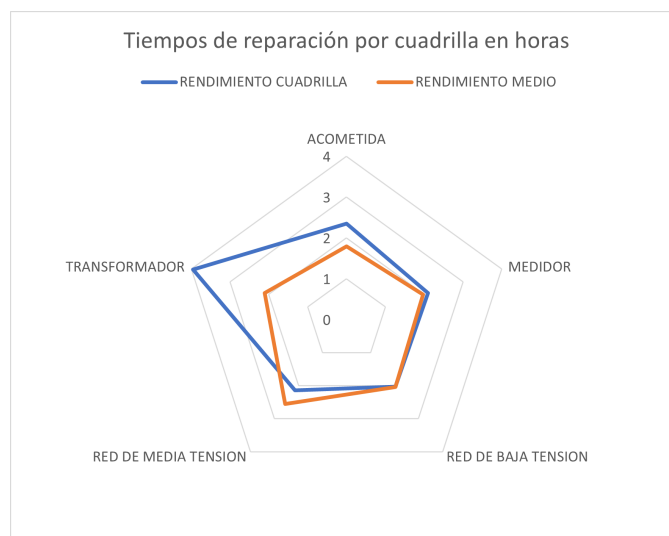


Figura 3.15: Cuadrilla B

Contando con esta información, es posible direccionar de manera asertiva las fallas identificadas en la red a los grupos de trabajo más idóneos para resolverlas; de igual forma se puede direccionar de manera particular el plan de formación y entrenamiento de tal forma que se logre hacer énfasis en las falencias particulares y lograr así una grupo de cuadrillas operativas uniforme que sea capaz de resolver cualquier tipo de falla dentro de los tiempos esperados y cumpliendo con los requisitos de seguridad necesarios.

Con esta metodología, se obtiene un registro de referencia que permite medir el rendimiento de los móviles con respecto a la media de ejecución en los datos históricos, haciendo posible identificar las habilidades de cada cuadrilla con 2 objetivos fundamentales que son: el primero, asignarle las actividades en las cuales tiene mejor rendimiento; y el segundo, direccionamiento específico del plan de formación para cada cuadrilla en particular, para asegurar su desarrollo técnico de acuerdo a las necesidades de la operación.

Capítulo 4

Análisis de resultados

Como se describe en el capítulo 3, la metodología inicia con los indicadores de gestión que se usan como referencia para evaluar el cumplimiento de las metas; de acuerdo con la predicción de la volumetría de fallas presentada en la sección 3.3 se ajusta la capacidad operativa de manera oportuna; a partir de la clasificación de fallas presentada en la sección 3.4 se define el equipamiento de las cuadrillas y se direccionan hacia los sitios donde se espera que se presenten las fallas de acuerdo con la ubicación de concentración presentada en la sección 3.5 y finalmente como criterio de decisión en el momento de asignar la falla, se selecciona la cuadrilla que cuente con las mejores habilidades de acuerdo con el modelamiento presentado en la sección 3.6.

El modelo presentado obedece a parte de la experiencia de 6 años en la atención de fallas en la zona norte de la ciudad de Bogotá, donde se implementaron de manera empírica algunas estrategias que fueron consolidadas en esta propuesta como una metodología secuencial de asignación de ordenes de trabajo a las cuadrillas más eficientes para cada tipo de falla, acompañada de un modelo de predicción de la volumetría de fallas para el dimensionamiento eficiente de la capacidad operativa necesaria para la atender la totalidad de las fallas dentro de los tiempos esperados.

Es una práctica común que los OR definan indicadores intermedios de manera estratégica que miden la oportunidad de resolución de las fallas con el objetivo de asegurar el cumplimiento de los indicadores regulatorios de SAIDI y SAIFI. Para el caso de estudio los principales indicadores definidos por el OR son la Oportunidad de atención en clientes masivos, oportunidad en la atención de fallas de Mayor impacto y el tiempo de llegada al primer punto.

Los resultados de este modelo se presentan en dos partes. La primera consiste en los resultados de las estrategias implementadas durante la experiencia en la atención de fallas en la zona norte de la ciudad de Bogotá y la segunda, los modelos y estrategias que complementan

la metodología propuesta para asegurar la optimización eficiente de los tiempos de atención de las fallas.

4.1. Resultados de la experiencia

A partir de la observación minuciosa de la dinámica de aparición de fallas, se identificó que se trata de un fenómeno aleatorio; pero que tiene un comportamiento típico en aspectos como hora en que aparecen, día de la semana, condiciones atmosféricas, zonas de la ciudad y todo esto se relaciona con la tipicidad de la falla misma.

La primera observación obedece a la cantidad de fallas en el transcurso del día, por lo que se configuraron turnos de trabajo para cubrir la necesidad de reparaciones en el transcurso del día, alineados a a la dinámica de aparición. En la tabla 4.1 se muestra la cantidad de cuadrillas asignadas a cada turno de trabajo.

Tabla 4.1: Capacidad operativa

Hora del día	CUADRILLA																		Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
6:00	1	1																	2
7:00	1	1																	2
8:00	1	1	1	1	1														5
9:00	1	1	1	1	1														5
10:00	1	1	1	1	1	1	1	1	1										9
11:00	1	1	1	1	1	1	1	1	1										9
12:00	1	1	1	1	1	1	1	1	1										9
13:00	1	1				1	1	1	1										6
14:00			1	1	1					1	1	1	1	1	1				9
15:00			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				13
16:00			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				13
17:00						1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				10
18:00						1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				10
19:00										1	1	1	1	1	1				6
20:00										1	1	1	1	1	1				6
21:00										1	1	1	1	1	1				6
22:00																1	1	1	3
23:00																1	1	1	3
0:00																1	1	1	3
1:00																1	1	1	3
2:00																1	1	1	3
3:00																1	1	1	3
4:00																1	1	1	3
5:00																1	1	1	3

Esta capacidad operativa está alineada con la volumetría de fallas que se presentan durante el día. En la figura 4.1 se presenta la curva de cantidad de fallas en la hora que van apareciendo versus la cantidad de cuadrillas destinadas para atenderlas. Aquí es importante resaltar que la cantidad de cuadrillas es mucho más grande que la cantidad de fallas debido a que el tiempo medio de reparación generalmente el mucho más de una hora es decir que cuanto mayor es el tiempo de reparación, más cuadrillas se requieren para resolver las fallas en el tiempo establecido.

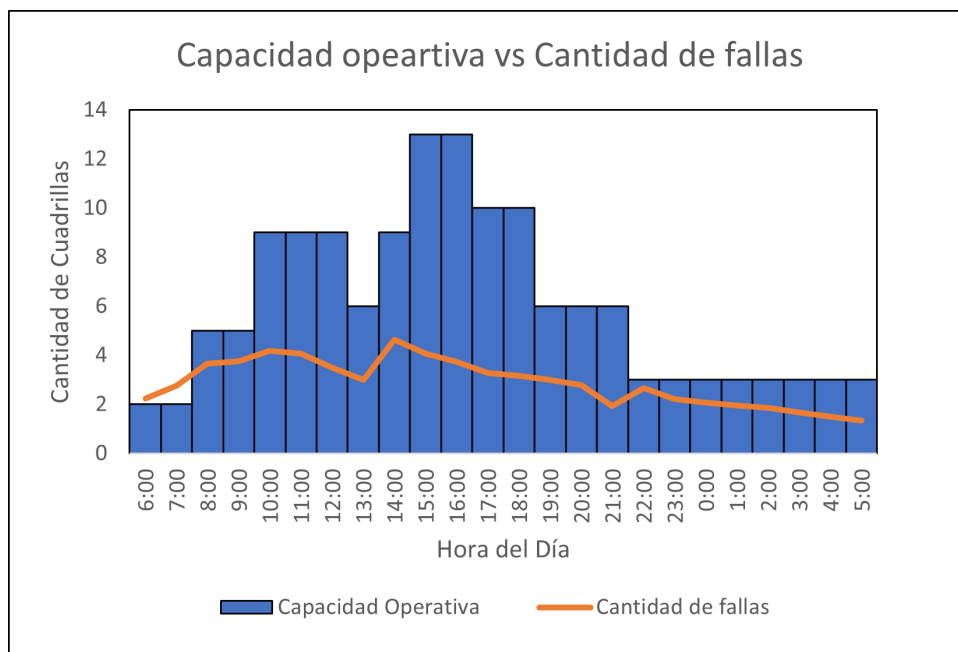


Figura 4.1: Capacidad operativa vs fallas

Durante el tiempo de experiencia también se observó que existen zonas de mayor concentración de fallas por lo que se asignaron móviles a estos sitios. Es decir que se programó el inicio de turno en las zonas de concentración de fallas con el objetivo de reducir los tiempos de desplazamiento. En la figura 4.2 se presenta la ubicación que se le dio a las cuadrillas para el inicio de turno con el equipamiento pesado para que estuvieran en la capacidad de atender cualquier tipo de falla en el menor tiempo posible.

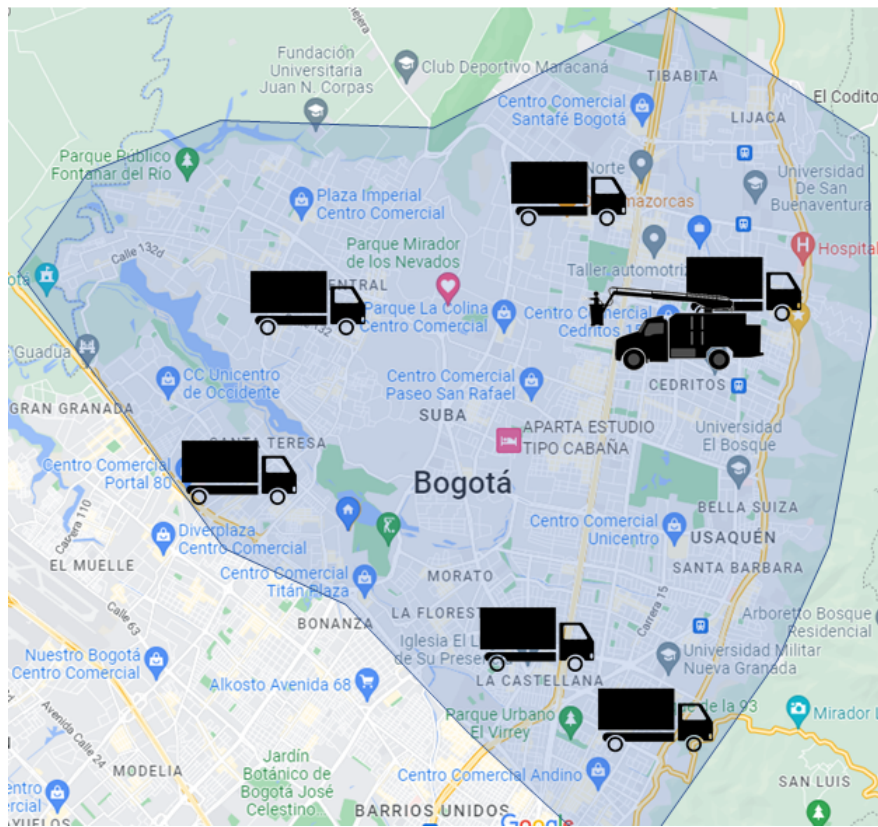


Figura 4.2: Ubicación de cuadrillas

También se observó que algunos grupos de trabajo son capaces de reparar determinados tipos de fallas en menos tiempo que otros aun cuando las condiciones sean similares y por ello se especializaron algunos grupos de trabajo para atender las fallas más complejas. Con estas estrategias, además de un esquema de remuneración variable que involucra los resultados individuales de cada cuadrilla con el cumplimiento de los objetivos, se obtuvieron los resultados que se presentan a continuación.

El indicador de Oportunidad en la Atención de fallas en clientes Masivos (AEM) consiste en resolver por lo menos el 80% de las fallas en un tiempo menor o igual a 2.5 horas y se calcula como se muestra en la ecuación 3.1 presentada en la sección de metas de indicadores de gestión

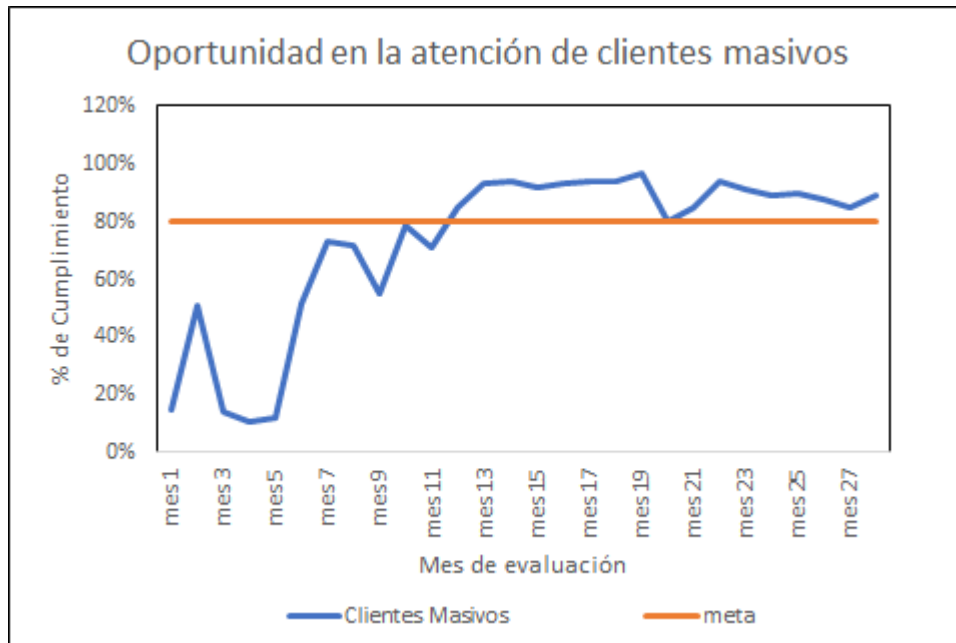


Figura 4.3: Oportunidad de Atención Clientes Masivos

Como se observa en la figura 4.3 con la implementación parcial y empírica de la metodología se logró alcanzar las metas y muestra que es eficaz y sostenible en el tiempo. También se observa que hay meses donde no se logra el objetivo; estos son los meses de noviembre y diciembre donde se presenta el fenómeno observado en la figura 3.2 que aún no había sido caracterizado y no se tomaron las medidas pertinentes. No obstante, con la implementación de la metodología propuesta en este trabajo es completamente factible identificar con anterioridad los cambios en las probabilidades de densidades de fallas y ajustar la programación de los turnos de los equipos de trabajo y lograr contar con la capacidad operativa suficiente justo en los momentos en que la operación lo requiere.

En relación al indicador de Oportunidad en la atención de fallas de mayor impacto que se mide como se indica en la ecuación 3.2 presentada en la sección de metas de indicadores de gestión, consiste en la resolución de las fallas que afectan en media tensión que por lo general afectan a una gran cantidad de clientes en un tiempo no mayor a 7 horas; por su naturaleza son mucho más complejas de resolver y requieren de equipamiento pesado como grúas de fuerza, carros canasta y herramienta especial.

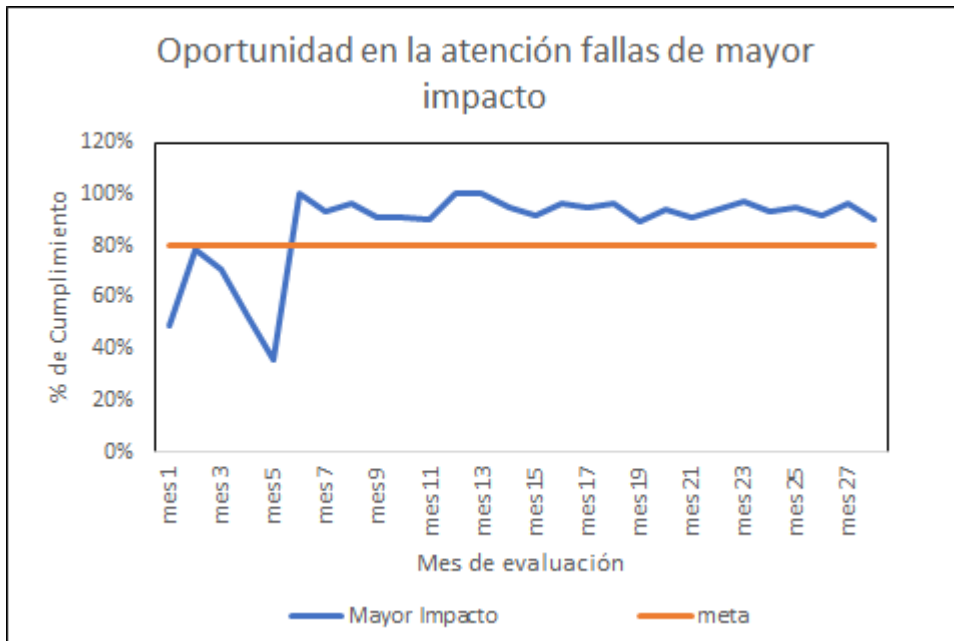


Figura 4.4: Oportunidad de Atención Mayor Impacto

En la figura 4.4 se observa que la implementación parcial de la metodología tardó 7 meses en alcanzar las metas propuestas; El principal factor que impacta este tipo de actividades es el entrenamiento de los grupos de trabajo debido a que los trabajos a realizar son más especializados y a la capacidad de prelistamiento que se logre tener de todos los recursos logísticos, en especial los materiales y los equipos especializados de gran envergadura como carros canasta y/o grúas de fuerza, además de las herramientas especializadas para la búsqueda de fallas complejas como trazadores de redes subterráneas, equipos de identificación de fallas en cables XLPE y equipos de pruebas VLF que son necesarios siempre antes de conectar cables nuevos o reparados.

En este sentido, también cobra suma importancia la mejora continua en la formación de los grupos de trabajo ya que el hecho de que los trabajos son más complejos, también se ven involucradas condiciones de seguridad que son sumamente importantes de controlar y solo el nivel de entrenamiento de los grupos de trabajo y el direccionamiento asertivo de centro de control son los factores que pueden garantizar la integridad de la salud de los trabajadores.

Para lograr atender las fallas de mayor impacto en tiempos menores o iguales a los establecidos es de suma importancia llegar muy rápido a los sitios de falla identificados por el Centro de Control. Para ello y considerando los problemas de movilidad en la ciudad de Bogotá es importante lograr ubicar los equipos de trabajo en sitios estratégicos donde se pre-

sente la mayor probabilidad de falla, de tal forma que en el momento de recibir la solicitud de Centro de Control se logre reducir los tiempos de desplazamiento entre el punto de su ubicación hacia el punto señalado por el Centro de control.

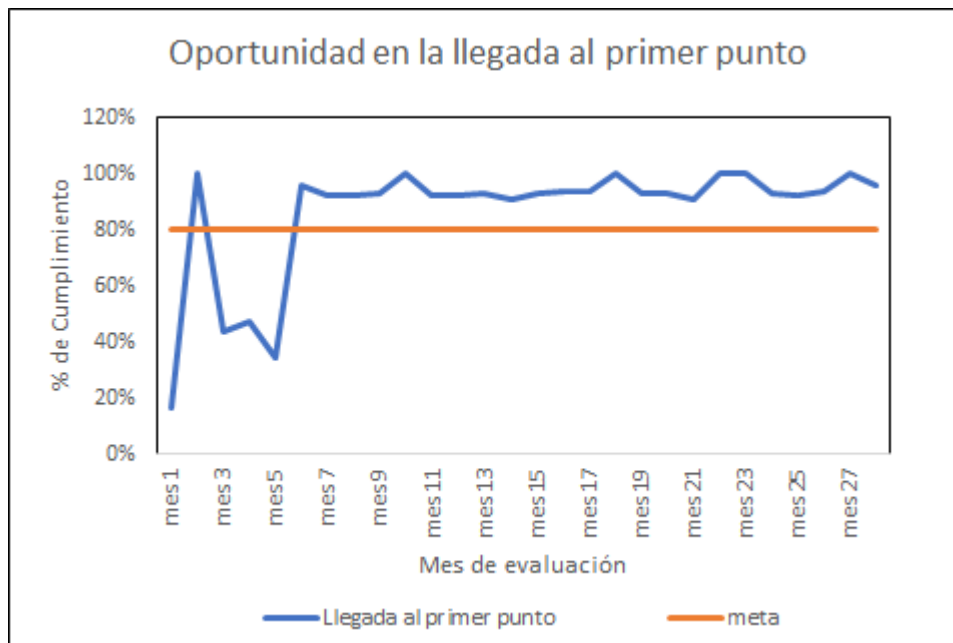


Figura 4.5: Llegada al Primer Punto

La meta propuesta para la llegada al primer punto señalado por el centro de control es de 0.5 horas en no menos del 90% de los casos. La gráfica 4.5 muestra que la ubicación estratégica de los grupos de trabajo logra el cumplimiento de los objetivos.

Es evidente que los resultados aquí presentados logran mostrar que existe una mejora sostenida en el tiempo en cuanto al cumplimiento de las metas; sin embargo, es importante considerar que los indicadores de Calidad en la prestación del servicio son cada vez más exigentes y por ello es necesario una implementación completa de la metodología propuesta y la implementación en un sistema de información que cuente con la capacidad de aprendizaje continuo permitiría aprovechar al máximo el potencial de la metodología.

4.2. Complemento del modelo

Como la necesidad de mejorar la calidad del servicio es cada vez más exigente, se hace necesario complementar el modelo para lograr la optimización planteada como objetivo, y alcanzar las metas que son cada vez más altas. Por ello se hace necesario observar los momentos

en que, a pesar de las medidas implementadas, no se logra cumplir con las metas y establecer las principales causas. En este sentido se identifica que estas obedecen principalmente a capacidad operativa insuficiente en algunos horarios del día, pero también se identifica que hay momentos en que se presentan tiempos muertos. Analizando los datos históricos se encuentra que cada mes del año tiene un comportamiento diferente que está afectado por diferentes factores típicos como la temporada invernal, verano, época de vientos, época de fiestas, entre otros. A manera de ejemplo se presenta en la figura 4.6 la diferencia del comportamiento de las fallas entre los meses de febrero y noviembre.

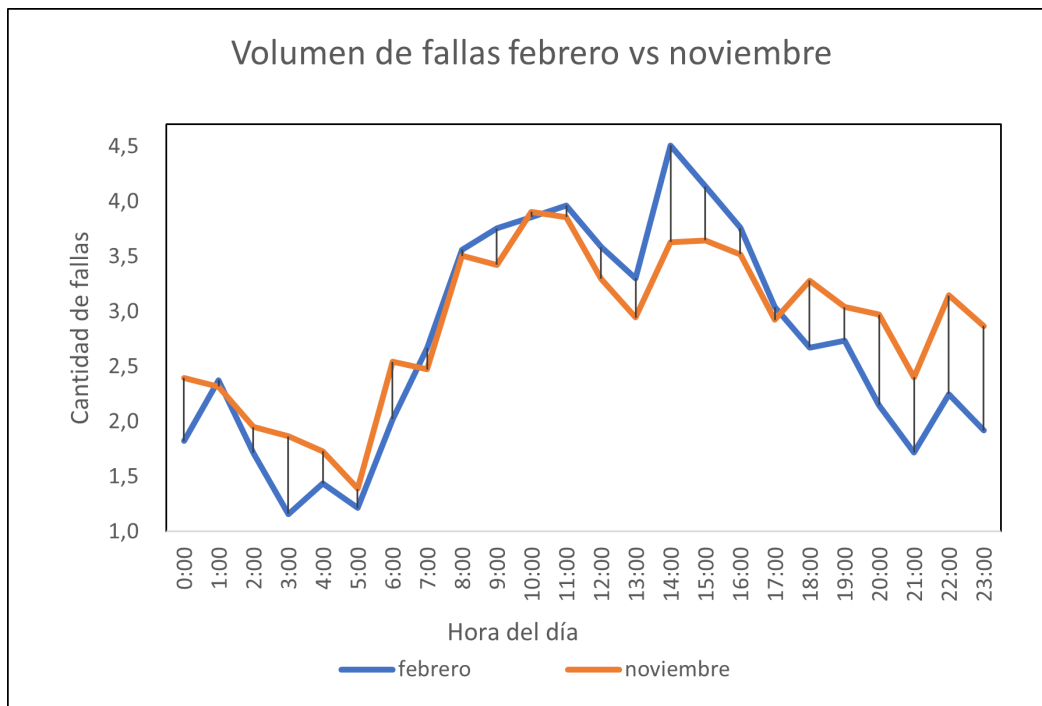


Figura 4.6: Fallas en febrero vs noviembre

Como se observa en esta figura, en el mes de febrero tiene un comportamiento que presenta un pico de fallas entre las 14 y 15 horas, además de un descenso importante en el resto de la tarde para llegar a valores mínimos hacia las 21 horas; mientras que el mes de noviembre, la cantidad máxima de se presenta a las 10 horas y el descenso es lento durante el resto del día, llegando a la noche con cantidades un poco inferiores y evidentemente más alto que lo que ocurre en el mes de febrero. Por lo anterior, es necesario que parte de la capacidad operativa que en febrero estaba programada para el turno de trabajo de la tarde, se desplace en el tiempo para que cubra las horas de la noche como se presenta en la figura 4.7

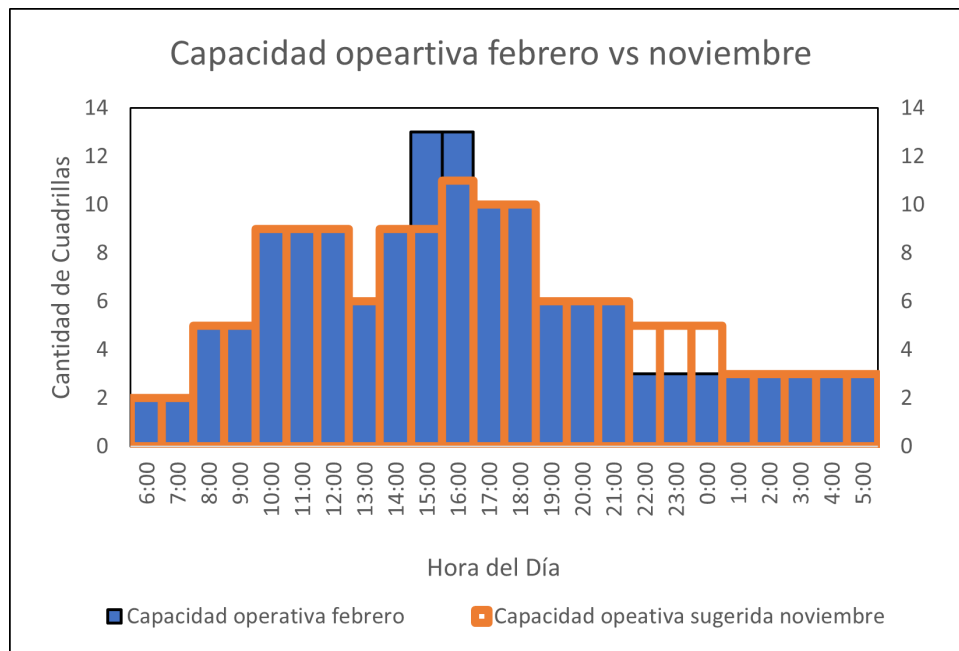


Figura 4.7: Capacidad operativa febrero vs noviembre

Si bien es cierto que el comportamiento de las fallas varía de mes a mes y el ajuste de los turnos de trabajo mejora la oportunidad en la respuesta, también es cierto que la variación durante el día puede ocasionar que se ocurran momentos en que la capacidad operativa no alcance para cubrir la necesidad. Por esta razón es necesario predecir en un tiempo más corto la variación que se pueda presentar durante el día y así contar con la información necesaria para hacer coordinar los refuerzos adecuados.

Considerando que fallas tienen un comportamiento que varía en función al día de la semana, mes del año, condiciones climatológicas, épocas del año como temporadas de vacaciones, semana santa, días especiales, etc., se propone como complemento a la metodología un modelo de predicción del comportamiento de la aparición de fallas como el presentado la sección 3.3 en donde se evidencia con claridad en la figura La figura 3.3 la diferencia entre los días de la semana en horarios y meses por lo que es necesario dinamizar la configuración de turnos de trabajo para contar con la capacidad operativa necesaria en el momento oportuno.

Como se muestra en la figura 4.8 muestra la capacidad del modelo de predecir con un nivel de acierto del 75 % en las primeras 6 horas siguientes al momento del ejercicio. Haciendo la corrida de 25 días aleatorios, se encuentra que el modelo acierta en un 72 % de las veces que es un valor realmente aceptable, considerando que se puede alimentar con más factores que pueden mejorar el resultado como las condiciones climatológicas y días particulares que

afectan el consumo.

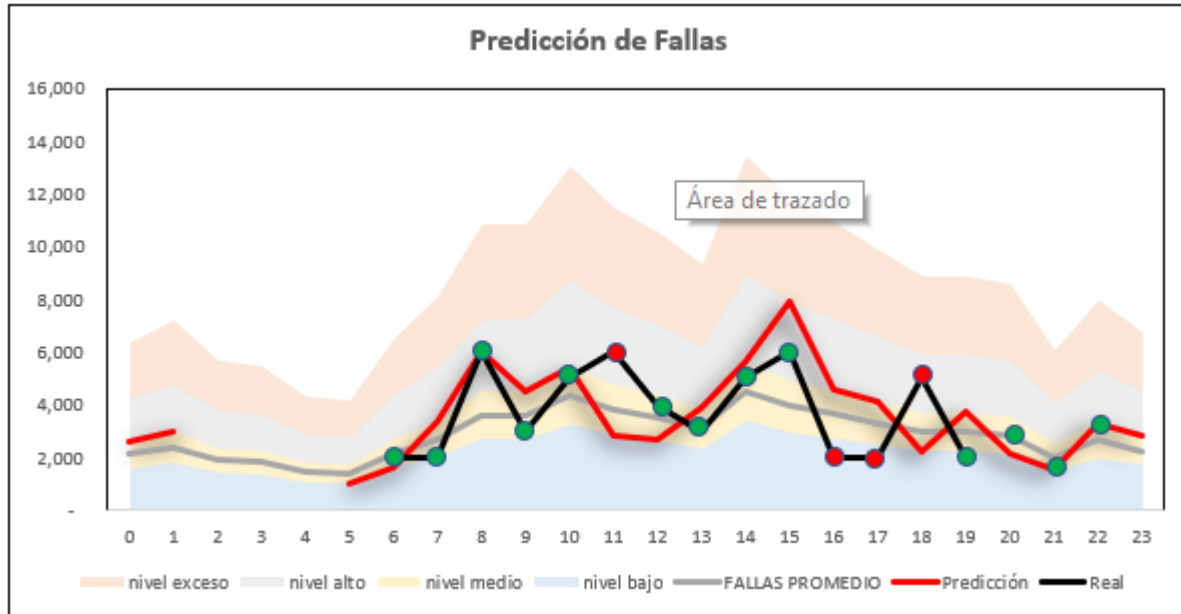


Figura 4.8: Predicción vs Real

Para medir el nivel de acierto, se cuentan como acierto los datos en donde el dato real queda dentro del rango indicado en la predicción. En la figura de ejemplo se observa que para el día presentado, de 17 datos posibles, el modelo acertó en 14 marcados con puntos verdes y falló en 4 marcados con puntos rojos.

En este caso de ejemplo se corrió el modelo de predicción a las 6 horas y desde ese momento se puede ver que en las horas 8, 14 y 15, el volumen de fallas estará en el nivel alto, permitiendo así contar con información suficiente para ajustar oportunamente los turnos de trabajo o solicitar refuerzos operativos desplazando trabajos programados de acuerdo al nivel de cumplimiento de los indicadores.

Ahora bien, una vez estimada la cantidad de fallas que se van a presentar durante el transcurso del día, se continúa con el modelo ubicando estratégicamente las cuadrillas en los sectores donde se presentan los centroides de concentración de fallas como se presenta en la sección 3.5. De esta manera se destina a cada zona las cuadrillas con el equipamiento adecuado de acuerdo con la tipicidad de las fallas presentada en la sección 3.4. La figura 4.9 muestra el resultado de la ubicación de esta sectorización.

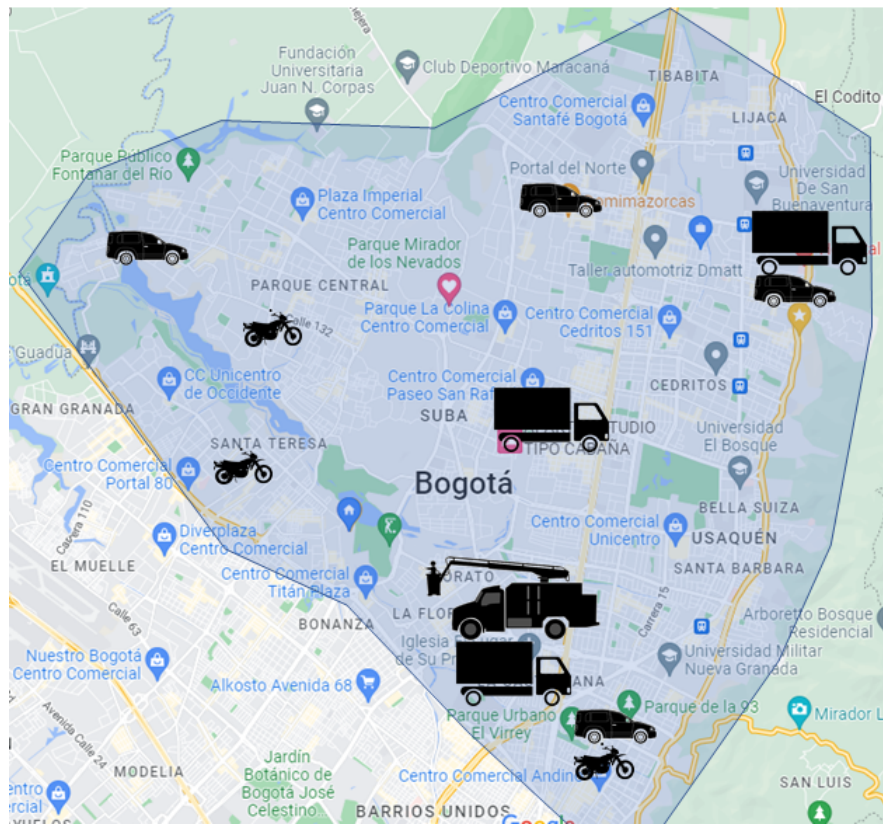


Figura 4.9: Nueva ubicación de cuadrillas

Comparando esta nueva ubicación de cuadrillas con la presentada en la figura 4.2 se puede observar que se logra una mayor cobertura con cuadrillas menos robustas lo que representa a su vez una menor inversión en vehículos, equipos, herramientas, etc. Y así mismo se requiere menor cantidad de técnicos en relación con la cantidad de cuadrillas.

Como producto de la medición y gestión del rendimiento de cada cuadrilla, se obtiene que cada grupo de trabajo va evolucionando en el tiempo reduciendo el tiempo que tarda en reparar cada tipo de fallas. A manera de ejemplo, la figura 4.10 muestra cómo un grupo de trabajo cuyo rendimiento inicial en la reparación de las fallas en transformadores y en medidores le tomaban mucho tiempo y al finalizar el periodo de evaluación se ve como se mejoran estos tiempos acercándose a los rendimientos esperados.

La gestión del rendimiento de los grupos de trabajo está por fuera del alcance de este trabajo; sin embargo, la información aquí obtenida es base fundamental para el desarrollo de las metodologías de formación y desarrollo de habilidades del personal.

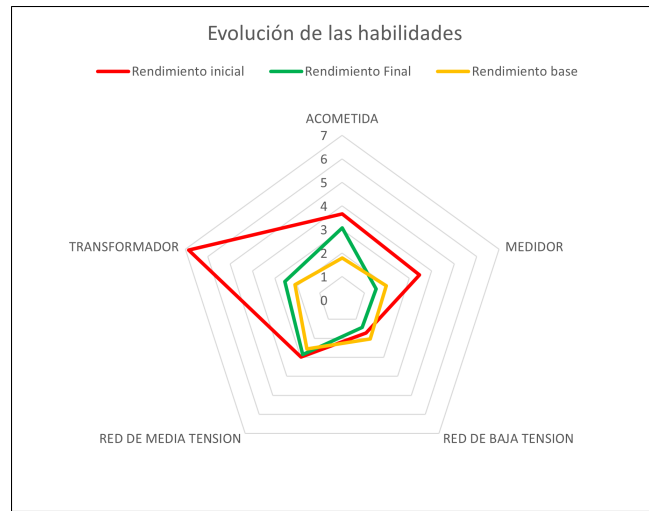


Figura 4.10: Evolución del rendimiento de una cuadrilla

Así mismo, la sumatoria de todos los grupos de trabajo van reduciendo los tiempos de reparación de las fallas, logrando así la optimización de los tiempos de atención planteada como objetivo. La figura 4.11 muestra como se va mejorando el tiempo medio medido en periodos de años.



Figura 4.11: Evolución del rendimiento general

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Conclusiones generales

Como resultado de este trabajo, se puede concluir que se logra presentar una metodología clara de aprendizaje continuo que conduce a la optimización de los tiempos de atención de fallas en las redes de distribución de energía eléctrica.

La aparición de las fallas del servicio de energía tiene un comportamiento aleatorio que puede ser modelado con ayuda de la metodología de las cadenas de Markov.

El modelo de predicción de la volumetría de fallas presenta una asertividad del 72% y permite anticipar las necesidades de ajustar la capacidad operativa destinada para la atención de las fallas. Para mejorar la precisión del modelo es necesario complementar los datos con más datos históricos y alimentar el modelo con datos como por ejemplo días relevantes que modifiquen el patrón de comportamiento del uso del servicio, históricos y pronóstico de lluvias, entre otros.

Las fallas en las redes de distribución presentan una tipicidad que se puede clasificar de acuerdo con su causa y ubicación en la red. Así mismo es posible destinar el recurso operativo con el equipamiento necesario para las respectivas reparaciones.

Las fallas en las redes de distribución se concentran en zonas geográficas de acuerdo con la tipicidad definida y así mismo es posible ubicar estratégicamente, cuadrillas con los equipamientos necesarios para acometer la mayoría de las fallas que se presentan en cada zona reduciendo los tiempos de desplazamiento y los recursos necesarios.

La metodología propuesta facilita el monitoreo y asignación de ordenes de trabajo a las cuadrillas de acuerdo con la clasificación de cada falla y a las habilidades de los operarios.

La gestión de las habilidades de los operarios es uno de los factores más importantes dentro del proceso de optimización de tiempos de atención de fallas en redes de distribución de energía eléctrica.

5.2. Aportes

Se aporta una metodología de optimización de tiempos de atención de fallas del servicio de energía en redes de distribución.

Se aporta un modelo de predicción de la volumetría de fallas con un nivel de acierto del 72 %.

El modelo de predicción de la volumetría de fallas presentado aporta información importante para la toma de decisiones oportunas en la previsión de la capacidad operativa necesaria para atender el volumen de fallas esperado con varias horas de anticipación.

Se aporta una clasificación de fallas de acuerdo con su tipología, alineada con la destreza de los grupos de trabajo permite que se facilite la medición de los resultados y evaluar el rendimiento y eficacia de la metodología conduciendo de manera natural a la optimización del proceso.

Se aporta una ubicación geográfica de la concentración de fallas clasificada de acuerdo a su tipología para direccionar los grupos de trabajo con el equipamiento apropiado para la mayoría de las fallas del sector, lo que optimiza en gran medida las inversiones y la asertividad en la asignación de datos a los grupos de trabajo.

Se presenta un modelo de medición de tiempos de habilidades de las cuadrillas para la resolución de fallas de acuerdo con la tipología específica el cual permite contar con información suficiente para el despliegue de un plan de formación específico y personalizado para cada cuadrilla de acuerdo a sus propios resultados comparados contra los esperados; aportando de gran manera en la gestión del rendimiento del personal para el despeje de las fallas dentro de los tiempos esperados.

5.3. Trabajos futuros

Alimentar la base de datos del histórico de fallas con días importantes que pueden generar una modificación en los patrones de uso del servicio de energía, así como datos históricos y pronóstico de lluvias, además de predicciones climatológicas.

Ampliar la metodología de gestión del rendimiento del personal hacia factores de habilidades blandas y construcción detallada del plan de formación.

Desarrollo de un software que automatice los modelos aquí presentados.

Referencias

- [1] F. Roos and S. Lindah, “Distribution system component failure rates and repair times—an overview,” *Nordic Distribution and Asset Management Conference*, pp. 1–6, 2004.
- [2] W. S. Carrera Parra, “Modelo de dimensionamiento de cuadrillas para la atención de fallas en el sistema de distribución de CODENSA S.A. ESP,” pp. 1–96, 2016.
- [3] A. Camargo, D. Roca-servat, C. P. Sánchez, J. D. Arias-henao, and K. Furlong, *La urbanización de las aguas en Colombia*. Editorial Universidad Pontificia Bolivariana, 2022, primera ed ed., 2022.
- [4] CREG, “25 Años De Regulación En El Sector Energético,” *Journal of Chemical Information and Modeling*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2019.
- [5] Comision de Regulacion de Energia y Gas CREG, “Resolucion CREG 097,” 2008.
- [6] A. R. Penin, *Sistemas SCADA*. 2013.
- [7] T. Valencia and D. Rodríguez, “información de Cloud de Google Maps e indicadores de confiabilidad,”
- [8] C. J. Zapata, J. Díaz, M. L. Ocampo, J. D. Marriaga, J. U. Patiño, and A. F. Gallego, “The repair process of five Colombian power distribution systems,” *2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, T and D-LA 2010*, no. 1, pp. 278–284, 2011.
- [9] Ieee, “IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology,” *Office*, vol. 121990, no. 1, p. 1, 1990.
- [10] M. Navas, “Estudio de la fiabilidad de los sistemas reparables y desarrollo de un procedimiento de análisis multivariante,” *Universidad Compluense de Madrid*, pp. 1–85, 2017.

- [11] C. J. Zapata, S. C. Silva, H. I. González, O. L. Burbano, and J. A. Hernández, “Modeling the repair process of a power distribution system,” *2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, T and D-LA*, pp. 1–7, 2008.
- [12] XM, “XM Administradores del mercado eléctrico, Url: <https://www.xm.com.co/consumo/historicos-de-demanda>,” Online lastchecked = agosto 2022.
- [13] E. G. . Diego Carrión 1, Estuardo Correa 1, “Predicción de la Demanda Eléctrica a Corto Plazo Mediante Cadenas de Markov y Monte Carlo,” *RISTI - Revista Iberica de Sistemas e Tecnologias de Informacao · May 2020*, no. May, p. 18, 2020.
- [14] V. A. Gómez, R. A. Peña, and C. Hernández, “Identificación y localización de fallas en sistemas de distribución con medidores de calidad del servicio de energía eléctrica,” *Informacion Tecnologica*, vol. 23, no. 2, pp. 109–116, 2012.
- [15] M. Mirzaei, M. Z. Ab Kadir, E. Moazami, and H. Hizam, “Review of fault location methods for distribution power system,” *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 3, no. 3, pp. 2670–2676, 2009.
- [16] H. Zhao, Z. Lu, J. Zhang, X. Li, X. Guo, and X. Sun, “Method to decide a multi-fault rush repair robust strategy in power distribution networks,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 56, no. September 2018, pp. 91–101, 2016.
- [17] Google, “Google Maps Platform Distance Matrix API, Url: <https://developers.google.com/maps/documentation/distance-matrix>,” Online lastchecked = 17 Abril 2022.
- [18] Google, “Google Maps Platform Directions API , Url: <https://developers.google.com/maps/documentation/directionshelp-amp-support>,” Online lastchecked = 17 Abril 2022.
- [19] S. R. Castaño, *ANÁLISIS DE DATOS DE FALLA*. PhD thesis, Universidad Nacional de Colombia, 2014.
- [20] C. J. Zapata, A. Torres, D. S. Kirschen, and M. A. Ríos, “Some common misconceptions about the modeling of repairable components,” *2009 IEEE Power and Energy Society General Meeting, PES '09*, vol. 1, pp. 1–8, 2009.
- [21] Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, “diagnostico calidad 2019 011220,” p. 67, 2000.

- [22] S. M. Ross, *Introduction to probability models*. 11 ed., 2014.
- [23] Noelia Cebreiro Rodríguez, “Principios básicos de las cadenas de Markov,” 2021.
- [24] J. A. Mijaos Lopez, “libro de : Investigación de Operaciones II,” 2019.
- [25] A. C. H. Diego Moreno, Jaime F . Aguayo-González, “INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA DE COLAS (LÍNEAS DE ESPERA),” p. 21, 2017.
- [26] E. A. Olajuyin, P. K. Olulope, and E. T. Fasina, “An overview on reliability assessment in power systems using CI approaches,” *Archives of Electrical Engineering*, vol. 71, no. 2, pp. 425–443, 2022.
- [27] T. O. Bompa, *Periodización. Teoría y metodología del entrenamiento*. Editorial Hispano Europea, 2016.
- [28] M. L. Edward M. Mone, *Employee Engagement Through Effective Performance Management*. 2nd editio ed., 2018.
- [29] M. Ikbal, Gunawan, M. Pasulu, M. Syam, M. Effendi, Muspiha, and Y. Yusriadi, “Training and rewards for performance improvement through personnel motivation,” *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, pp. 3316–3323, 2021.
- [30] A. Thibault, “Better leveraging monetary rewards in the 21st century workplace using Self-Determination Theory Better Leveraging Monetary Rewards in the 21 st Century Workplace Using Self-determination Theory,” 2022.

