

Análisis del impacto de las fallas en el sistema de distribución de energía eléctrica

Felipe Murillo Arango

Hugo Alexander Orozco Correa

Asesor

Jorge Luis Quintero Lopez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería ECBTI

Especialización Ciencia de Datos y Analítica

2025

Resumen

El proyecto estudia el impacto de las fallas en el sistema de distribución de energía eléctrica con el objetivo de optimizar los recursos operativos, reducir los tiempos de desplazamiento y minimizar la no disponibilidad del servicio. La meta principal es garantizar el cumplimiento de los indicadores de calidad establecidos por la regulación vigente en Colombia, en particular la Resolución 015 de 2018 de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) (Energía, 2018). Este análisis es esencial para asegurar que las empresas encargadas de la distribución eléctrica puedan mantener la calidad del servicio dentro de los parámetros exigidos, brindando así un servicio más confiable a los usuarios.

El marco normativo de la Resolución 015 de 2018 establece lineamientos precisos sobre la calidad del servicio para los operadores de redes de distribución eléctrica en Colombia. Entre los aspectos clave que contempla esta resolución se encuentran los tiempos máximos permitidos de indisponibilidad del servicio, la frecuencia de las interrupciones, la actualización anual de estos parámetros y los esquemas de compensación a los usuarios afectados por fallas en el sistema. Además, se fijan metas de calidad que las empresas deben cumplir, las cuales son revisadas periódicamente con el fin de ajustarlas a las necesidades actuales del mercado y las condiciones de operación de las redes eléctricas.

Uno de los desafíos más importantes que enfrentan los operadores de redes eléctricas es cumplir con estos indicadores de calidad en medio de condiciones adversas, como las fallas provocadas por factores atmosféricos y la vegetación. Estas fallas, que se presentan con frecuencia en distintas partes del país, generan altos tiempos de indisponibilidad del servicio, lo que a su vez repercute negativamente en los indicadores de calidad que deben respetarse. A pesar de que existen restricciones en las actividades programadas que implican cortes de servicio, la

realidad es que las múltiples fallas diarias resultan difíciles de controlar y gestionar eficientemente. Esto aumenta no solo la frecuencia de las interrupciones, sino también los tiempos de indisponibilidad del sistema, lo que afecta tanto a los usuarios como a las empresas responsables de la distribución eléctrica. (Energía, 2018)

El proyecto se enmarca en el desarrollo tecnológico y la investigación aplicada dentro de la cadena de formación en el sector industrial. La tecnología juega un papel fundamental en la mejora de la gestión de las fallas y en la optimización de los recursos disponibles para atender las mismas. Al implementar soluciones tecnológicas avanzadas, se espera reducir significativamente los tiempos de respuesta ante las fallas y mejorar la eficiencia operativa, lo cual permitiría a los operadores de redes cumplir con los indicadores de calidad establecidos por la CREG (Energía, 2018) de manera más efectiva. De este modo, se busca no solo mejorar la calidad del servicio eléctrico, sino también minimizar las compensaciones que las empresas deben otorgar a los usuarios afectados por las interrupciones del servicio.

En conclusión, este proyecto se orienta a mejorar la gestión de las fallas en el sistema de distribución de energía eléctrica en Colombia, mediante el uso de tecnologías que optimicen los recursos operativos y reduzcan la frecuencia y duración de las interrupciones. Al abordar de manera eficiente las causas de las fallas y aplicar soluciones innovadoras, se podrá mejorar la calidad del servicio, cumpliendo con las exigencias regulatorias y beneficiando tanto a los operadores como a los usuarios finales del servicio eléctrico.

Palabras claves: Fallas, Sistema de distribución, Calidad del servicio, Optimización de recursos, Regulación energética.

Abstract

The project focuses on studying the impact of failures in the electricity distribution system with the goal of optimizing operational resources, reducing response times, and minimizing service unavailability. The main objective is to ensure compliance with the quality indicators established by current regulations in Colombia, particularly the Resolution 015 of 2018 issued by the Commission of Regulation of Energy and Gas (CREG). This analysis is essential to ensure that companies responsible for electricity distribution can maintain service quality within the required parameters, thereby providing a more reliable service to users.

The regulatory framework of Resolution 015 of 2018 sets precise guidelines regarding service quality for electricity distribution network operators in Colombia. Key aspects of this resolution include the maximum permitted service unavailability times, the frequency of interruptions, the annual update of these parameters, and the compensation schemes for users affected by system failures. Additionally, quality targets are established that companies must meet, which are periodically reviewed to adjust them to current market needs and the operational conditions of the electricity networks.

One of the most significant challenges faced by electricity network operators is complying with these quality indicators amidst adverse conditions, such as failures caused by weather factors and vegetation. These failures, which frequently occur in various parts of the country, generate high service unavailability times, negatively impacting the quality indicators that must be respected. Although there are restrictions on scheduled activities that require service interruptions, the reality is that the multiple daily failures are difficult to control and manage efficiently. This increases not only the frequency of interruptions but also the unavailability

times of the system, affecting both users and the companies responsible for electricity distribution. (Energía, 2018)

The project is embedded in technological development and applied research within the training chain in the industrial sector. Technology plays a fundamental role in improving failure management and optimizing the resources available to address them. By implementing advanced technological solutions, it is expected to significantly reduce response times to failures and improve operational efficiency, allowing network operators to more effectively meet the quality indicators established by CREG (Energía, 2018). Thus, the aim is not only to enhance the quality of electricity service but also to minimize the compensations that companies must provide to users affected by service interruptions.

In conclusion, this project aims to improve the management of failures in the electricity distribution system in Colombia by using technologies that optimize operational resources and reduce the frequency and duration of interruptions. By efficiently addressing the causes of failures and applying innovative solutions, it will be possible to enhance service quality, comply with regulatory requirements, and benefit both operators and end users of the electricity service.

Keywords: Failures, Distribution system, Service quality, Resource optimization, Energy regulation.

Tabla de Contenido

Introducción	11
Justificación	12
Objetivos.....	14
Objetivo General.....	14
Objetivo Específicos	14
Planteamiento del Problema	15
Marco Conceptual.....	16
Indicadores de Calidad.....	16
Sistemas de Distribución.....	17
Qué son Fallas en la Energía Eléctrica	17
Causas Externas que Afectan el Suministro de Energía	17
Lluvias e Inundaciones	18
Caída de Árboles u otros Elementos.....	18
Causas Internas que Afectan el Suministro de Energía	18
Falta de Mantenimiento en la Infraestructura Eléctrica.....	18
Estado de los Equipos y Red Empresarial	19
Metodología	20
Desarrollo Metodológico	24
Fase 1	24
Fase 2	25
Definicion de Variables a Mostrar	38
Definicion Visualizaciones Adecuadas	39

Construcción Modelo de Datos.....	40
Construcción Expresiones DAX.....	41
Construcción de Visualizaciones	41
Fase 5	44
Análisis de Resultados	44
Conclusiones	60
Recomendaciones del Trabajo Realizado	61
Referencias Bibliográficas	62

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Cronograma de Actividades</i>	21
Tabla 2 <i>Recursos</i>	22
Tabla 3 <i>Resultados o Productos Esperados</i>	23
Tabla 4 <i>Datos Objeto de Posteriores Análisis</i>	25
Tabla 5 <i>Costo Unitario del kWh/mes</i>	26

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Cargue Base de Datos</i>	28
Figura 2 <i>Base de Datos con las Columnas de Utilidad</i>	29
Figura 3 <i>Filtro para Identificar Datos Nulos</i>	29
Figura 4 <i>Formula del Cálculo de la Energía Eléctrica en Función del Tiempo</i>	30
Figura 5 <i>Cambio de Formato Hora y Fecha</i>	31
Figura 6 <i>Filtro Variable “IDE_CLASE_SUSPENSION”</i>	32
Figura 7 <i>Resumen Estadístico</i>	32
Figura 8 <i>Tiempos de Duración de las Fallas</i>	33
Figura 9 <i>Tiempo Duración de las Fallas</i>	34
Figura 10 <i>Energía no Suministrada Durante las Fallas</i>	35
Figura 11 <i>Matriz de Correlación</i>	36
Figura 12 <i>Relación Equipo Pade y Tipos de Fallas</i>	37
Figura 13 <i>Modelo Entidad Relación</i>	40
Figura 14 <i>Expresiones DAX</i>	41
Figura 15 <i>Cantidad de Fallas por Municipio</i>	42
Figura 16 <i>Tiempo de Interrupción por Tipo de Falla</i>	42
Figura 17 <i>Total Costo Energía no Servida</i>	43
Figura 18 <i>Filtro Activo de Fechas</i>	43
Figura 19 <i>Zona Afectada por Fallas</i>	44
Figura 20 <i>Cantida de Fallas por Municipio</i>	45
Figura 21 <i>Tipos de Fallas</i>	46
Figura 22 <i>Tiempos de Falla por Municipios</i>	47

Figura 23 <i>Tiempo de Duración de Fallas</i>	48
Figura 24 <i>Energía no Suministrada por Municipio</i>	49
Figura 25 <i>Energía no Suministrada por Tipo de Falla</i>	50
Figura 26 <i>Costo de Energía no Servida por Municipio</i>	51
Figura 27 <i>Costo de Energía no Servida por Tipo de Falla</i>	52
Figura 28 <i>Zonas Afectadas</i>	53
Figura 29 <i>Fallas Zonas</i>	54
Figura 30 <i>Fallas Corta Duración</i>	55
Figura 31 <i>Fallas de Mediana Duración</i>	55
Figura 32 <i>Fallas de Larga Duración</i>	56
Figura 33 <i>Zonas con mas Afectaciones</i>	57
Figura 34 <i>Tipos de Fallas en Zonas mas Afectadas</i>	58

Introducción

La calidad del servicio en la distribución de energía eléctrica es un aspecto crucial para garantizar el bienestar de los usuarios y la sostenibilidad del sistema energético. En Colombia, la Resolución 015 de 2018 de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) establece directrices que buscan mejorar la fiabilidad del servicio, fijando parámetros como los tiempos máximos de indisponibilidad de los activos eléctricos y la frecuencia de interrupciones. A pesar de estos esfuerzos, los operadores enfrentan desafíos significativos, como condiciones climáticas adversas y el crecimiento de la vegetación, que provocan fallas recurrentes en el suministro.

Esto ha llevado a que las metas de calidad sean cada vez más exigentes y a la implementación de esquemas de compensación más estrictos para los usuarios afectados. Sin embargo, las restricciones en la ejecución de actividades programadas que requieren cortes de servicio dificultan la realización de planes de expansión y mantenimiento. Por lo tanto, se vuelve esencial analizar el impacto de estas fallas en el sistema eléctrico, lo que permitirá optimizar la asignación de recursos y enfocar esfuerzos en el mantenimiento preventivo, contribuyendo así a la reducción de tiempos de indisponibilidad y mejorando la calidad del servicio en general.

Justificación

Actualmente, la presencia de fallas en las redes de distribución de energía eléctrica es una problemática que enfrentan todos los operadores de red ya que estas afectan los indicadores de calidad establecidos en la regulación vigente (CREG, Gestor normativo CREG, 2018), adicionalmente, se afectan la prestación del servicio que tiene impacto sobre la imagen y las finanzas de la organización. Por esta razón, es importante diseñar estrategias y metodologías que permitan disminuir los impactos que generan estas fallas eléctricas. (Zuñiga J. J., Scielo, 2020)

Sin embargo, se aprecia que los trabajos relacionados con este tema abordan situaciones puntuales de problemas en las redes de distribución de energía como fallas en transformadores de potencia (Bjelić, 2022), fallas en sistemas fotovoltaicos (Akram, 2022) y fallas en motores, pero no se trabajan metodologías que permitan a los operadores de red analizar los impactos detallados generados por fallas en sus redes de energía de acuerdo con los datos de su operación diaria.

Por lo tanto, el desarrollo de este trabajo permitirá conocer las zonas con más influencia de fallas y la tipología de eventos más recurrente, lo cual ayuda a una óptima asignación de los recursos operativos disponibles que minimicen los tiempos de reparación, además, permite orientar de forma adecuada las intervenciones por mantenimiento preventivo en dichas zonas para que estas sean más focalizadas y generen a futuro una reducción en la frecuencia de las interrupciones. (Zuñiga J. d., 2020)

Esto trae beneficios positivos a la organización, ya que al estar por debajo de los límites establecidos por la regulación vigente, minimiza las compensaciones económicas a los usuarios, reduce los tiempos de indisposición que se traducen en mayor energía vendida y, permite que se puedan ejecutar más actividades programadas que implican cortes del servicio, las cuales

impactan las inversiones en expansión y reposición de activos eléctricos (CREG, Gestor normativo CREG, 2018)

Objetivos

Objetivo General

Construir un modelo descriptivo que permita la identificación de los impactos de las fallas del sistema de distribución de energía eléctrica del departamento del Quindío a partir de los registros históricos de la operación del sistema consignados en el sistema de supervisión, control y adquisición de datos

Objetivo Específicos

Analizar los registros históricos de operación del sistema de distribución de energía eléctrica del departamento del Quindío para identificar patrones de fallas recurrentes, su frecuencia y duración, utilizando datos obtenidos del sistema de supervisión, control y adquisiciones de datos (SCADA)

Clasificar y categorizar los tipos de fallas del sistema de distribución de energía eléctrica con base en su impacto en los usuarios y en la infraestructura, determinando las zonas y los equipos del sistema más afectados

Construir un modelo descriptivo que integre minería de datos y técnicas estadísticas como diagramas de cajas, histogramas, medidas de tendencia central, medidas de dispersión y matrices de correlación para identificar los principales factores que influyen en la ocurrencia de fallas, utilizando los datos históricos almacenados en el SCADA.

Planteamiento del Problema

La resolución 015 de 2018 de la Comisión de Regulación de Energía y Gas establece los lineamientos referentes a calidad del servicio que deben cumplir todos los operadores de redes de distribución de energía eléctrica que prestan sus servicios en el territorio colombiano (CREG, Gestor normativo CREG, 2018).

Dichos lineamientos hacen referencia específicamente a los tiempos máximos de indisponibilidad de los activos eléctricos, frecuencia máxima de las interrupciones, actualización de dichos tiempos y frecuencias año tras año, esquemas de compensación a los usuarios afectados y las metas de calidad del servicio. (Superservicios, 2024)

En vista de que dichas metas e indicadores son cada vez más exigentes y los esquemas de compensación más estrictos, han hecho que la operación del sistema de distribución tenga restricciones y limite la ejecución de actividades programadas que requieren cortes del servicio, lo que pone en riesgo la ejecución de los planes de expansión y reposición de los activos del sistema eléctrico. (normativa, 2015)

Sin embargo, la limitación en la ejecución de actividades programadas que requieren cortes del servicio no ha sido suficiente para dar cumplimiento a los indicadores de calidad, ya que diariamente se presentan múltiples fallas principalmente por condiciones atmosféricas y vegetación, generando que los tiempos de indisponibilidad y frecuencia de interrupción sean altos. (Enel, Trabajamos por un servicio de calidad, conoce cómo lo hacemos, 2024)

Dado lo anterior, resulta de vital importancia poder analizar el impacto de las fallas en el sistema eléctrico, ya que esto permite la adecuada asignación de recursos operativos que contribuirán a la disminución de los tiempos de indisponibilidad y, poder enfocar actividades de mantenimiento preventivo para disminuir la frecuencia de interrupción. (Sostenible, 2021)

Marco Conceptual

Indicadores de Calidad

La Resolución CREG 015 de 2018 enmarca los parámetros de calidad para el servicio de energía en Colombia, una base esencial para asegurar un abastecimiento eléctrico confiable y de excelencia para los usuarios. Estos criterios fomentan la transparencia, la eficiencia y la competitividad en el ámbito eléctrico, al tiempo que promueven la satisfacción del cliente y la mejora en la calidad de vida de los usuarios (CREG, Gestor normativo CREG, 2018).

Los indicadores de calidad del servicio eléctrico abarcan diversos aspectos cruciales, como la continuidad, la estabilidad de la tensión y la calidad general del suministro. Para evaluar cada uno de estos aspectos, se utilizan indicadores específicos que ofrecen un análisis minucioso del funcionamiento del sistema eléctrico y la satisfacción del usuario. (Verena Mercado Polo, 2017)

En esta introducción, nos adentraremos en los indicadores clave definidos por la Resolución CREG 015, enfocándonos en su importancia, su influencia en la calidad del servicio eléctrico y su significado para los diversos participantes del sector, desde los entes reguladores hasta las empresas prestadoras de servicios públicos y los usuarios finales.

SAIDI: Este indicador representa la duración media por usuario de los eventos ocurridos en el Sistema de Distribución Local (SDL) de la región j durante el año t , expresado en horas anuales.

SAIFI: Este indicador representa la frecuencia media por usuario de los eventos ocurridos en el Sistema de Distribución Local (SDL) del OR j durante el año t , expresado en cantidad de eventos anuales.

DUI: El indicador DIU mide la duración total de los eventos que experimenta cada usuario en el Sistema de Distribución Local (SDL) de una Región Operativa (OR) durante un año.

FIU: El indicador FIU refleja la cantidad total de eventos que experimenta cada usuario en el Sistema de Distribución Local (SDL) de una Región Operativa (OR) durante un año. (CREG, Gestor normativo CREG, 2018).

Sistemas de Distribución

Un sistema de distribución de energía eléctrica comprende un conjunto de equipos diseñados para alimentar de manera segura y confiable una variedad específica de cargas, distribuidas en diversos niveles de voltaje y ubicadas en distintas áreas. (CREG, Ariae, 2008) Estos sistemas se clasifican en función de las características de las cargas, los niveles de energía implicados y los estándares de fiabilidad y seguridad requeridos. Las categorías incluyen sistemas industriales, comerciales, urbanos y rurales. (master, 2020)

Qué son Fallas en la Energía Eléctrica

Las fallas eléctricas se caracterizan por interrupciones imprevistas que impactan el suministro de energía. Estas interrupciones pueden ocasionar cortocircuitos, sobrecargas, pérdidas de energía, detenciones en la producción, necesidad de mantenimiento correctivo y variaciones de voltaje. Existen numerosos factores tanto internos como externos que pueden influir en la calidad del suministro eléctrico de tu empresa. A continuación, te detallamos los más habituales. (Enel, 2023)

Causas Externas que Afectan el Suministro de Energía

Las condiciones climáticas extremas como fuertes lluvias, vientos intensos, la caída de árboles y otros factores externos, son algunas de las causas principales que pueden desencadenar

fallas en las redes eléctricas. (Enel, 2023) Estas fallas, a su vez, pueden resultar en posibles interrupciones en el suministro de energía para tu empresa. (Santiago, 2019)

Lluvias e Inundaciones

Durante lluvias o inundaciones, es común que el servicio eléctrico se vea afectado. Durante estos eventos climáticos, no podemos realizar intervenciones en las redes eléctricas debido a que el agua es conductora de electricidad, lo que podría representar un riesgo para la seguridad de nuestros trabajadores. (Enel, 2023)

Caída de Árboles u otros Elementos

En áreas rurales o con abundante vegetación, es común que el suministro eléctrico se vea afectado por la caída de árboles u otros elementos en las redes. Esto ocurre principalmente durante condiciones climáticas adversas.

Cuando este tipo de incidentes ocurren en zonas protegidas, no podemos intervenir hasta obtener los permisos necesarios de las autoridades ambientales, como la Secretaría del Medio Ambiente o las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR).

Es importante tener en cuenta que estas situaciones pueden influir en los tiempos de mantenimiento y en la recuperación del servicio eléctrico.

Causas Internas que Afectan el Suministro de Energía

Ciertos factores internos, como la falta de mantenimiento en la infraestructura eléctrica de la empresa, el estado de los equipos o el problema de energía reactiva, pueden tener un impacto directo en el servicio de energía de tu empresa. (Enel, 2023)

Falta de Mantenimiento en la Infraestructura Eléctrica

En ocasiones, las empresas experimentan fallas en su sistema eléctrico debido a la falta de mantenimiento en su infraestructura interna. Esto ocurre porque muchos de los componentes

de dicha infraestructura, como aisladores, conductores eléctricos, protecciones, premoldeados y sistemas de puesta a tierra, tienden a deteriorarse con el tiempo. (Enel, 2023)

Por lo tanto, es recomendable que las empresas realicen revisiones periódicas de estos componentes para prevenir fallas repentinas e inesperadas.

Estado de los Equipos y Red Empresarial

La falta de un mantenimiento adecuado de los equipos o la infraestructura en condiciones óptimas puede ocasionar interrupciones imprevistas que afecten la producción de una empresa. Esta situación puede generar pérdidas económicas y provocar daños a corto y largo plazo.

Cuando se emprenden proyectos de construcción o instalaciones eléctricas dentro de las empresas y estas no cumplen con las normativas necesarias, pueden surgir problemas que afecten el funcionamiento de equipos sensibles. En estos casos, una solución viable sería contratar servicios de instalaciones provisionales, ya que proporcionamos la energía necesaria para el desarrollo de proyectos, obras o eventos en tu empresa. (S.A, 2018)

Cuando se emprenden proyectos de construcción o instalaciones eléctricas dentro de las empresas y estas no cumplen con las normativas necesarias, pueden surgir problemas que afecten el funcionamiento de equipos sensibles. En estos casos, una solución viable sería contratar servicios de instalaciones provisionales, ya que proporcionamos la energía necesaria para el desarrollo de proyectos, obras o eventos en tu empresa. (S.A, 2018)

Metodología

Se adoptará la metodología CRISP-DM (Zuñiga J. J., DialnetPlus, 2020) que contempla las siguientes etapas:

Fase 1: Identificación de variables requeridas

Fase 2: Obtención y consolidación de datos

Fase 3: Transformación de las bases de datos

Fase 4: Construcción de modelos y visualizaciones

Fase 5: Aplicación y evaluación de resultados

En primera instancia, se requiere conocer cuáles son las variables que se tienen en cuenta para definir los impactos para los sistemas de distribución de energía eléctrica en aspectos económicos, técnicos, calidad del servicio y penalizaciones regulatorias; posteriormente, es necesario identificar los reportes disponibles en el sistema SCADA que contengan dichas variables para proceder con el descargue de estos en una ventana de tiempo acuerda para realizar los respectivos análisis.

Luego de la extracción y consolidado de las bases de datos, es necesario la transformación de las mismas para eliminar información incoherente y para garantizar que las variables tengan las unidades y escalamientos adecuados, y la división de datos de las columnas en caso de ser requerido.

Al finalizar el procesamiento y preparación de las bases de datos, se procede con la definición de visualizaciones requeridas que permitan identificar, cuantificar y sectorizar los impactos de las fallas en los sistemas de distribución de energía eléctrica; lo cual da paso a la construcción del modelado de datos y visualizaciones que se aplicarán a la base de datos bajo estudio.

Finalmente, se aplican los modelos y visualizaciones definidos para conocer los tipos de fallas más recurrentes, los sectores más afectados, la cantidad de clientes impactados, energía no suministrada e ingresos dejados de percibir producto de las fallas eléctricas; resultados que se confrontarán con el plan de mantenimiento para identificar si se debe replantear la priorización algunas de sus actividades, A continuación en la tabla 1 se muestra el cronograma de actividades.

Tabla 1

Cronograma de Actividades

Actividad	Mes
Fase 1 Identificación de variables	Septiembre semana 1
Fase 2 Identificación de reportes	Septiembre semana 2
Fase 2 Definición ventana de tiempo	Septiembre semana 3
Fase 2 Generación de reportes	Septiembre semana 4
Fase 3 Eliminación de dato incoherentes	Octubre semana 1
Fase 3 División de columnas	Octubre semana 2
Fase 3 Análisis exploratorio	Octubre semana 3
Fase 4 Definición de variables a mostrar	Noviembre semana 1
Fase 4 Definición visualizaciones adecuadas	Noviembre semana 2
Fase 4 Construcción modelo de datos	Noviembre semana 3
Fase 4 Construcción expresiones DAX	Diciembre semana 1
Fase 4 Construcción de visualizaciones	Diciembre semana 2
Fase 4 Pruebas y refinamientos	Diciembre semana 3
Fase 5 Análisis de resultados	Diciembre semana 1
Fase 5 Propuesta del plan de mantenimiento	Diciembre semana

Nota. Esta tabla presenta un cronograma de actividades relacionadas con un proyecto de análisis datos. Se divide en meses y se organiza por etapas o tareas específicas.

Tabla 2*Recursos*

Recurso	Descripción	Presupuesto
Equipo Humano	Generación de reportes de SCADA, construcción de modelos, ejecución de pruebas y documentación de resultados	\$ 2.000.000
Equipos y Software	Power BI Office Anaconda Computador personal	\$ 1.000.000
Viajes y Salidas de Campo	No aplica	\$ 0
Materiales y suministros	Conexión a internet Energía eléctrica	\$ 500.000
Bibliografía	No aplica	\$ 0

Nota. La tabla presenta los recursos necesarios para un proyecto de análisis de datos con una planificación clara en la ejecución del proyecto.

Finalmente, en la tabla 3 se listan los recurso requeridos para ejecutar dicho proyecto.

Tabla 3

Resultados o Productos Esperados

Resultado/producto esperado	Indicador	Beneficiario
Dashboad de análisis de fallas	# Visualizaciones creadas/ # de visualizaciones planeadas	Operador de red
Propuesta de ajustes al plan de mantenimiento	Ajuste de actividades de acuerdo con la priorización obtenida de los resultados	Operador de red
Presentación del proyecto	Aprobación proyecto	Estudiantes

Nota. La tabla presenta los recursos necesarios para un proyecto de análisis de datos con una planificación clara en la ejecución del proyecto.

Desarrollo Metodológico

Fase 1

Teniendo en cuenta que se busca identificar los impactos de las fallas eléctricas sobre los sistemas de distribución de energía en aspectos técnicos, económicos y de calidad del servicio, es necesario contar con datos que muestren la siguiente información al momento de la ocurrencia de una falla eléctrica:

- Indicador de la existencia de una falla
- Fecha y hora de ocurrencia de la falla
- Tiempo de duración de la falla
- Transformador de distribución afectado
- Cantidad de clientes afectados
- Potencia dejada de suministrar
- Energía no suministrada
- Causa de la falla
- Elemento encargado de despejar la falla
- Ingresos dejados de percibir durante la falla
- Con los cuales se realizan análisis detallados que permiten determinar las

siguientes variables:

- Top de fallas más recurrentes
- Zonas con más influencia de fallas eléctricas
- Equipos de despeje de fallas con mayor actuación
- Energía no suministrada
- Ingresos no percibidos a causa de las fallas

- Cantidad de clientes afectadas

Estos resultados permitirán identificar si las acciones de mantenimiento preventivo están bien enfocadas o si por el contrario se requieren ajustes para que las acciones correctivas sean menores y se disminuyan los impactos negativos para la organización.

Fase 2

Los datos buscados son principalmente técnicos que provienen del registro de la falla al momento de su ocurrencia y al momento de la normalización de esta, para su obtención, el sistema SCADA del operador de red cuenta con un reporte llamado LAC_TRAFO que dispone de una serie de datos de los cuales se destacan en la tabla 4 que serán objeto de los posteriores análisis:

Tabla 4

Datos Objeto de Posteriores Análisis

Nombre del campo	Descripción del campo
IDE_EVENTO	Consecutivo de la existencia de una falla
FEC_DESENERGIZACION	Fecha y hora de ocurrencia de la falla
FEC_ENERGIZACION	Fecha y hora de restablecimiento del servicio
IDE_CIRCUITO	Circuito de media tensión afectado con la falla
NUM_NODO_TRANSFORMADOR	Transformador de distribución afectado con la falla
NUM_CLIENTES	Cantidad de clientes afectados con la falla
NUM_KVA_NOSUMINISTRADOS	Potencia dejada de suministrar durante la falla
VLR_CONSUMO_NO_SUMINISTRADO	Energía no suministrada durante la falla

Nombre del campo	Descripción del campo
NOM_CODIGO_APERTURA	Causa de la falla
DUR_H	Tiempo total de interrupción del servicio
EQUIPO_PADRE	Elemento de despeje de la falla
IDE_CLASE_SUSPENSION	Indica si la apertura fue programa a por falla

Nota. Ahora, los aspectos económicos se determinan a partir del costo unitario del kWh/mes de cada uno de los meses del periodo bajo estudio, que para caso se selecciona desde enero de 2022 a octubre de 2023 como se muestra en la tabla 5

Tabla 5

Costo Unitario del kWh/mes

Periodo	Valor
ene-22	\$ 702,5128
feb-22	\$ 701,2761
mar-22	\$ 774,0074
abr-22	\$ 721,7316
may-22	\$ 733,5254
jun-22	\$ 756,6915
jul-22	\$ 755,0888
ago-22	\$ 791,5260
sep-22	\$ 766,0150
oct-22	\$ 745,1925
nov-22	\$ 785,6214

Periodo	Valor
dic-22	\$ 781,3154
ene-23	\$ 784,4165
feb-23	\$ 838,8644
mar-23	\$ 919,1992
abr-23	\$ 898,8206
may-23	\$ 812,2770
jun-23	\$ 867,2306
jul-23	\$ 833,0597
ago-23	\$ 849,7496
sep-23	\$ 853,1847
oct-23	\$ 859,0759

Nota. Se realiza el cargue de las bases de datos para hacer la depuración y análisis exploratorio inicial como se muestra en la Figura 1.

Fase 3

Figura 1

Cargue Base de Datos

```
In [1]: import pandas as pd

In [2]: df = pd.read_excel('D:\escritorio\Información Académica\Analítica y Ciencia de Datos\Semestre 2\Trabajo de grado 2\Datos.xlsx')
<

In [3]: df.info()

<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
Int64Index: 1048001 entries, 266980 to 283979
Data columns (total 39 columns):
#   Column                                Non-Null Count  Dtype
---  ---                                -
0   IDE_EVENTO                            1048001 non-null int64
1   EST_TRAFO_AFECTADO                    1048001 non-null int64
2   IDE_SWITCHE                            1048001 non-null int64
3   IDE_SWITCHE_SUPERIOR                  1047916 non-null float64
4   NUM_SOLICITUDES_SERVICIOS             1048001 non-null int64
5   FEC_DESENERGIZACION                   1048001 non-null object
6   FEC_ENERGIZACION                       1048001 non-null object
7   IDE_MANIOBRA_DESENERGIZACION          1048001 non-null int64
8   IDE_MANIOBRA_ENERGIZACION             1048001 non-null int64
9   IDE_CIRCUITO_DESENERGIZACION          1047938 non-null object
10  FEC_REGISTRO                           1048001 non-null object
11  IDE_TRAFO_AFECTADO                     1048001 non-null int64
```

Después de realizar el cargue de la base de datos se observa que esta tiene 39 variables, y varias de ellas son nulas o tienen tamaños diferentes al de la totalidad del dataframe, sin embargo, como no todas las variables son requeridas, se procede con la construcción de la base final con las columnas de utilidad antes de iniciar el análisis exploratorio y proceso de depuración. Esta nueva base de datos dispone de 12 variables requeridas para el propósito establecido como se ilustra en la figura 2:

Figura 2

Base de Datos con las Columnas de Utilidad

```
In [4]: df_final = df[['IDE_EVENTO', 'FEC_DEENERGIZACION', 'FEC_ENERGIZACION', 'IDE_CIRCUITO',
<
In [5]: df_final.info()

<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
Int64Index: 1048001 entries, 266980 to 283979
Data columns (total 12 columns):
#   Column                                Non-Null Count  Dtype
---  -
0   IDE_EVENTO                            1048001 non-null int64
1   FEC_DEENERGIZACION                    1048001 non-null object
2   FEC_ENERGIZACION                      1048001 non-null object
3   IDE_CIRCUITO                          1048001 non-null object
4   NUM_NODO_TRANSFORMADOR                1048001 non-null object
5   NUM_CLIENTES                          1048001 non-null int64
6   NUM_KVA_NOSUMINISTRADOS              1048001 non-null int64
7   VLR_CONSUMO_NO_SUMINISTRADO          1046870 non-null float64
8   NOM_CODIGO_APERTURA                  1048001 non-null object
9   DUR_H                                 1048001 non-null float64
10  EQUIPO_PADRE                          1048001 non-null object
11  IDE_CLASE_SUSPENSION                  1048001 non-null int64
```

Al obtener la nueva base de datos se observa una cantidad de campos nulos en la columna "VLR_CONSUMO_NO_SUMINISTRO", por lo tanto, se realiza el filtrado para identificar los datos que acompañan estos campos nulos como se muestra en la figura 3.

Figura 3

Filtro para Identificar Datos Nulos

```
In [7]: filtrado_nulos = df_final[df_final['VLR_CONSUMO_NO_SUMINISTRADO'].isnull()]
In [8]: filtrado_nulos
Out[8]:
```

A_CLIENTES	NUM_KVA_NOSUMINISTRADOS	VLR_CONSUMO_NO_SUMINISTRADO	NOM_CODIGO_APERTURA	DUR_H	EQUIPO_PADRE	IDE_CLASE_SUSPENSION
1	5	NaN	APERTURA POR TRANSFORMADOR QUEMADO	51.186	S-1350	1
1	15	NaN	APERTURA POR CONDICIONES ATMOSFERICAS	16.236	S-494	1
0	5	NaN	APERTURA POR CONDICIONES ATMOSFERICAS	16.236	S-496	1
1	100	NaN	FALLA ACTIVO NIVEL 1 PROPIEDAD PARTICULAR	96.729	S-398C	1

Se aprecia que los campos nulos no son coherentes ya que corresponden a eventos que tienen una duración determinada, por lo tanto, deberían tener un valor diferente de cero. Para imputar estos datos, se hace uso de las variables "NUM_KVA_NOSUMINISTRADOS" y "DUR_H" para aplicar la fórmula del cálculo de la energía eléctrica en función del tiempo. Se ejecuta nuevamente el resumen estadístico y ya no hay valores nulos como se muestra en la figura 4.

Figura 4

Formula del Cálculo de la Energía Eléctrica en Función del Tiempo

```
In [*]: df_final['VLR_CONSUMO_NO_SUMINISTRADO'] = df_final.apply(
    lambda row: row['NUM_KVA_NOSUMINISTRADOS']*row['DUR_H']*0.1 if pd.isnull(row[
        axis=1
    ])
)
```

```
In [10]: df_final.info()
```

```
<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
Int64Index: 1048001 entries, 266980 to 283979
Data columns (total 12 columns):
#   Column                Non-Null Count  Dtype
---  ---
0   IDE_EVENTO            1048001 non-null int64
1   FEC_DEENERGIZACION    1048001 non-null object
2   FEC_ENERGIZACION      1048001 non-null object
3   IDE_CIRCUITO          1048001 non-null object
4   NUM_NODO_TRANSFORMADOR 1048001 non-null object
5   NUM_CLIENTES          1048001 non-null int64
6   NUM_KVA_NOSUMINISTRADOS 1048001 non-null int64
7   VLR_CONSUMO_NO_SUMINISTRADO 1048001 non-null int64
8   NOM_CODIGO_APERTURA  1048001 non-null object
9   DUR_H                 1048001 non-null float64
10  EQUIPO_PADRE          1048001 non-null object
11  IDE_CLASE_SUSPENSION  1048001 non-null int64
```

Ahora, es necesario cambiar los formatos a las columnas que contienen fechas por lo tanto, se toman las columnas "FEC_DEENERGIZACION" y "FEC_ENERGIZACION" para separar las fechas de las horas como se muestra en la figura 5.

Figura 5

Cambio de Formato Hora y Fecha

```
In [11]: # Cambiar el formato de las columnas
df_final['FEC_DESENERGIZACION'] = pd.to_datetime(df_final['FEC_DESENERGIZACION'], format='%d/%m/%y %I:%M:%S,%f %p')
df_final['FEC_ENERGIZACION'] = pd.to_datetime(df_final['FEC_ENERGIZACION'], format='%d/%m/%y %I:%M:%S,%f %p')

# Separar la fecha y la hora en nuevas columnas
df_final['FECHA_DESENERGIZACION'] = df_final['FEC_DESENERGIZACION'].dt.date
df_final['HORA_DESENERGIZACION'] = df_final['FEC_DESENERGIZACION'].dt.time
df_final['FECHA_ENERGIZACION'] = df_final['FEC_ENERGIZACION'].dt.date
df_final['HORA_ENERGIZACION'] = df_final['FEC_ENERGIZACION'].dt.time

# Eliminar las columnas anteriores
df_final.drop('FEC_DESENERGIZACION', axis=1, inplace=True)
df_final.drop('FEC_ENERGIZACION', axis=1, inplace=True)
```

```
In [12]: df_final.info()
```

```
<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
Int64Index: 1048001 entries, 266980 to 283979
Data columns (total 14 columns):
#   Column                                Non-Null Count  Dtype
---  ---                                -
0   IDE_EVENTO                            1048001 non-null  int64
1   IDE_CIRCUITO                          1048001 non-null  object
2   NUM_NODO_TRANSFORMADOR                1048001 non-null  object
3   NUM_CLIENTES                          1048001 non-null  int64
4   NUM_KVA_NOSUMINISTRADOS              1048001 non-null  int64
5   VLR_CONSUMO_NO_SUMINISTRADO          1048001 non-null  int64
6   NOM_CODIGO_APERTURA                  1048001 non-null  object
7   DUR_H                                 1048001 non-null  float64
8   EQUIPO_PADRE                          1048001 non-null  object
9   IDE_CLASE_SUSPENSION                  1048001 non-null  int64
10  FECHA_DESENERGIZACION                  1048001 non-null  object
11  HORA_DESENERGIZACION                    1048001 non-null  object
12  FECHA_ENERGIZACION                      1048001 non-null  object
13  HORA_ENERGIZACION                       1048001 non-null  object
```

Teniendo en cuenta que la base de datos cuenta con eventos que corresponden a las actividades programadas, estas se deben retirar para que solo queden aquellas que indican fallas, por lo tanto, se filtra la "IDE_CLASE_SUSPENSION" por el indicador 1 como se muestra en la figura 6.

Figura 6

Filtro Variable "IDE_CLASE_SUSPENSION"

```
In [27]: df_final = df_final[df_final['IDE_CLASE_SUSPENSION']==1]
df_final
```

A partir de la depuración inicial se puede realizar el análisis exploratorio. Frente a las fallas que afectan el servicio de energía eléctrica, los aspectos más representativos son su duración y la energía no suministrada durante esta, por esta razón, se realiza un resumen estadístico de estas variables el cual se ilustra en la figura 7.

Figura 7

Resumen Estadístico

```
df_final[['VLR_CONSUMO_NO_SUMINISTRADO', 'DUR_H']].describe()
```

	VLR_CONSUMO_NO_SUMINISTRADO	DUR_H
count	1.008412e+06	1.008412e+06
mean	6.028520e-01	4.011589e-01
std	1.355831e+01	2.990384e+00
min	0.000000e+00	0.000000e+00
25%	0.000000e+00	1.000000e-03
50%	5.000000e-04	4.000000e-03
75%	1.306000e-02	2.400000e-02
max	4.455523e+03	7.439990e+02

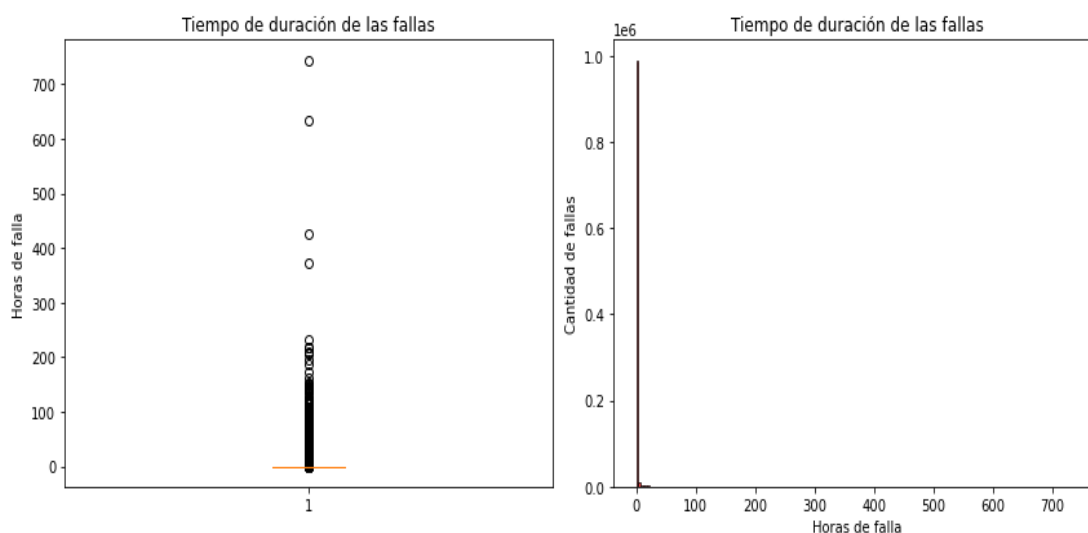
De este resumen estadístico se observa que existe gran dispersión y distancias considerables entre los valores máximos y mínimos, sin embargo, se aprecia que tanto para el

tiempo de duración y energía no suministrada el 75% de los datos está en rangos pequeños, 0.024 horas y 0.01306kWh/mes respectivamente, lo cual indica que la mayor parte de las fallas es corta duración y por consiguiente la energía no suministrada es poca.

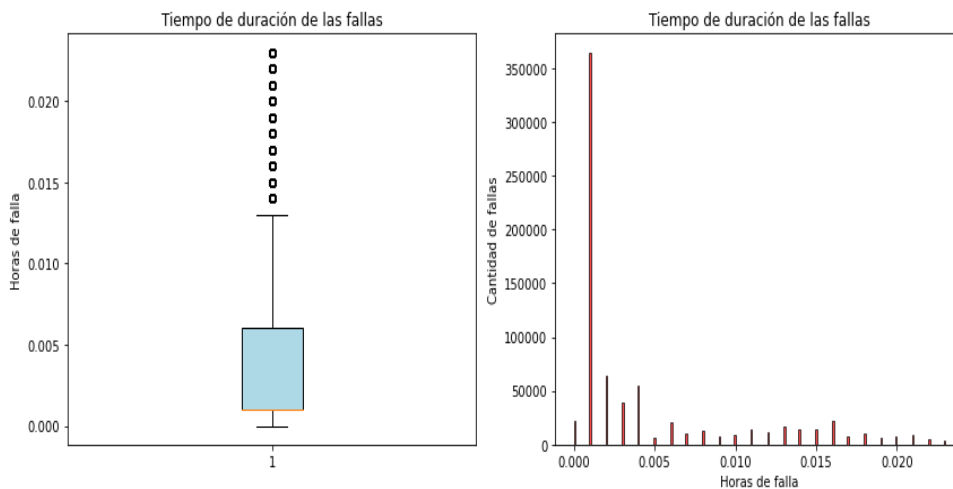
Para continuar el análisis exploratorio se utilizan histogramas y gráficas de cajas para visualizar la distribución de los datos, por lo tanto, se inicia con el tiempo de duración de las fallas el cual se ilustra en la figura 8.

Figura 8

Tiempos de Duración de las Fallas

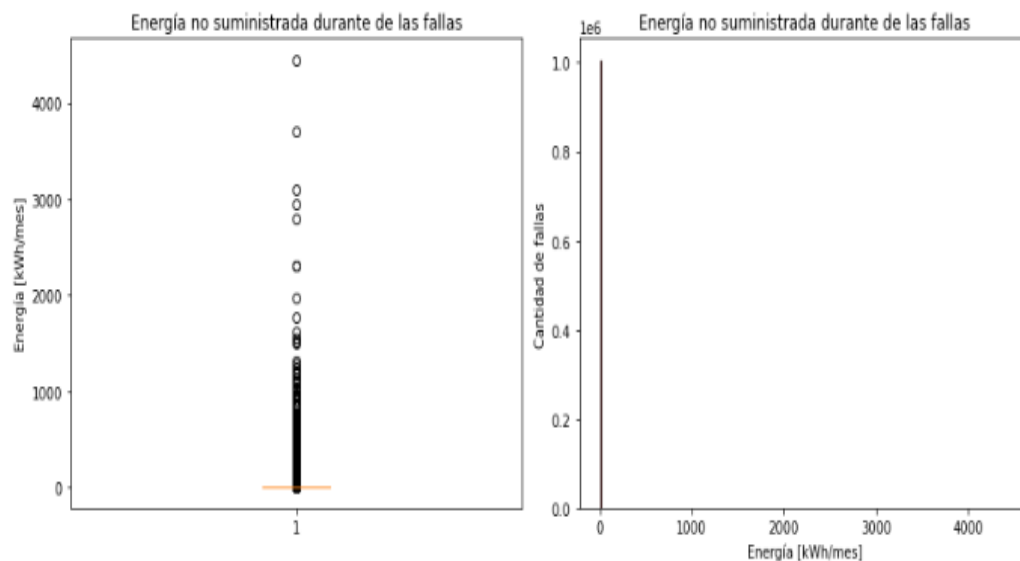


De estas visualizaciones se observa que la duración de las fallas se concentra en tiempos pequeños y que existen algunas con tiempos considerablemente altos, por esta razón, para obtener una mejor visualización se realiza un filtrado de los datos contenidos hasta el tercer cuartil para entender la distribución de mejor manera como se visualiza en la figura 9.

Figura 9*Tiempo Duración de las Fallas*

Estas nuevas visualizaciones muestran lo indicado en el resumen estadístico, que la mayoría de las fallas se encuentran con tiempos de restablecimiento pequeños, sin embargo, las fallas de alta duración no se extraerán de la base de datos ya que estas también deben ser analizadas porque pueden suministrar información importante para adecuar y direccionar actividades de mantenimiento.

De manera similar, se realiza el análisis gráfico de la energía no suministrada relacionada con los eventos ocurridos como se muestra en la figura 10.

Figura 10*Energía no Suministrada Durante las Fallas*

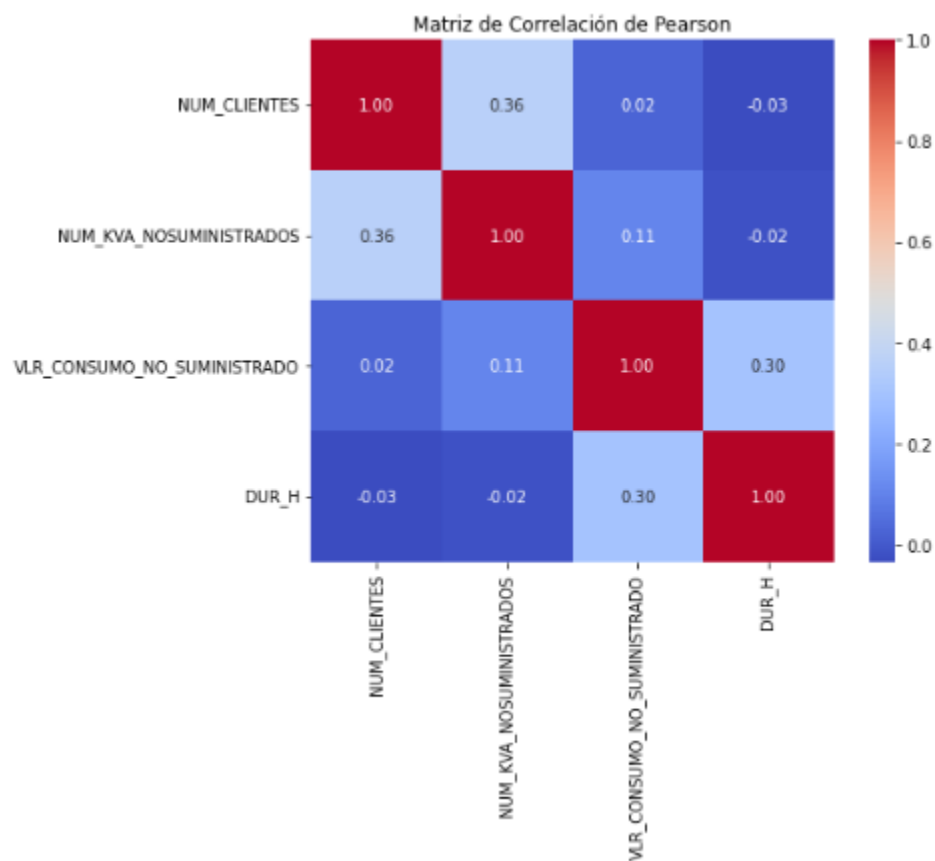
De estas visualizaciones se puede identificar que la energía no suministrada tiene relación con el tiempo de duración de las fallas ya que esta también es pequeña en la mayoría de las fallas.

Para profundizar el análisis se construye una matriz de correlación de la cual en primera instancia se puede evidenciar que existe una relación importante de la variable NUM_CLIENTES con las variables NUM_KVA_NOSUMINISTRADOS y VLR_CONSUMO_NO_SUMINISTRADO, esto refleja que la energía y potencia no suministrados dependen de la cantidad de usuarios de afectados durante las fallas; por otra parte, se observa que la relación de la variable DUR_H con la variable VLR_CONSUMO_NO_SUMINISTRADO es de 0.3, lo cual da a conocer que el tiempo de duración de las fallas tiene impacto sobre la energía dejada de suministrar. Finalmente, observa una relación completamente directa entre las variables

NUM_KVA_NOSUMINISTRADOS y VLR_CONSUMO_NO_SUMINISTRADO, lo cual tiene lógica ya que la energía es la potencia por unidad de tiempo, por lo tanto, la variación de una siempre afecta la otra en la misma proporción como se muestra en la figura 11.

Figura 11

Matriz de Correlación



Finalmente se realiza una prueba chi-cuadrado para determinar la relación entre los equipos padres del sistema de distribución y los tipos de fallas que se presentan como se muestra en la figura 12.

Figura 12

Relación Equipo Pade y Tipos de Fallas

```
In [29]: Tabla_2= pd.crosstab(df_final['EQUIPO_PADRE'], df_final['NOM_CODIGO_APERTURA'])
Tabla_2
```

```
Out[29]:
```

NOM_CODIGO_APERTURA	APERTURA DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA Y EQUIPOS ASOCIADOS, POR PRECAUCION.	APERTURA POR ANIMALES SOBRE LINEAS	APERTURA POR ARBOL O RAMA SOBRE LINEAS	APERTURA POR CAUSA DESCONOCIDA - ENSAYO AUTOMATICO	APERTURA POR CAUSA DESCONOCIDA - ENSAYO MANUAL	APERTURA POR CONDICIONES ATMOSFERICAS	APERTURA POR DAMOS SOBRE REDES DE OTROS OPERADORES DE RED	APERTURA POR DEFECTO EN AISLADORES
EQUIPO_PADRE								
C-0003	0	0	0	76	171	171	38	0
C-0005	0	0	0	27	3	21	0	0
C-0008	0	4	12	28	4	40	0	0
C-0009	0	0	0	4	3	1	0	0
C-0010	0	8	32	56	24	776	0	0
...
SWT83	0	1	0	2	3	2	1	0
SWT88	0	5	5	10	0	30	0	0
SWT91	0	0	15	41	6	134	0	0
SWT94	0	0	1	2	2	0	0	0
SWT95	0	1	0	2	3	2	1	0

2152 rows x 40 columns

```
In [31]: # Prueba chi cuadrado tabla 2

chi2, p, dof, expected = chi2_contingency(Tabla_2)

# Mostrar Los resultados
print("Resultados de la prueba chi-cuadrado:\n")
print(f"Chi-cuadrado: {chi2}\n")
print(f"P-valor: {p}\n")

Resultados de la prueba chi-cuadrado:

Chi-cuadrado: 1189566.8738825812

P-valor: 0.0
```

Del resultado obtenido, se puede observar que al tener un resultado alto en la prueba chi-cuadrado y un P-Valor inferior a 0.05, esto indica que existe una relación entre las variables analizadas, ya que se puede identificar que algunos tipos de fallas tienen mas tendencia de ocurrencia en unas zonas que en otras.

Fase 4

Definición de Variables a Mostrar

Después de llevar a cabo la depuración y transformación de los datos utilizando el software Python, y considerando el objetivo principal de este trabajo, se seleccionaron aquellas variables que tienen un impacto significativo tanto en el ámbito técnico como económico del sistema de distribución de energía eléctrica. La elección de estas variables se basa en su capacidad para ofrecer información clave sobre el comportamiento y el rendimiento del sistema, permitiendo una evaluación precisa de los efectos de las fallas.

En este sentido, se seleccionaron las siguientes variables para su análisis detallado:

Cantidad de fallas: Refleja el número total de incidentes que ocurren en el sistema de distribución, lo cual es fundamental para evaluar la frecuencia y la magnitud de los problemas técnicos.

Tiempos de interrupción: Representa la duración de las interrupciones en el servicio, lo cual tiene un impacto directo tanto en la calidad del servicio como en la satisfacción de los usuarios.

Energía no suministrada: Mide la cantidad de energía que no se distribuye debido a las fallas, lo cual es crucial para entender las pérdidas operativas y la eficiencia del sistema.

Costo de la energía no suministrada: Estima el valor económico asociado a la energía no suministrada debido a las fallas, lo que es esencial para evaluar las implicaciones financieras de las interrupciones y para el análisis de costos.

Zonas afectadas: Indica las áreas geográficas impactadas por las fallas, lo que permite identificar patrones en la distribución de los problemas y facilita la toma de decisiones estratégicas para mejorar la resiliencia del sistema.

El análisis de estas variables proporcionará una visión más clara y detallada del impacto de las fallas sobre el sistema eléctrico, permitiendo identificar las áreas más vulnerables y optimizar las estrategias de mantenimiento y reparación. Además, permitirá tomar decisiones informadas sobre posibles inversiones en infraestructura y en mejoras en los protocolos operativos, con el objetivo de reducir tanto los costos económicos como las interrupciones del servicio.

Definición Visualizaciones Adecuadas

En esta etapa, con la ayuda del software Power BI, se crearon visualizaciones interactivas que permitirán a la persona encargada de analizar los datos obtener un mejor entendimiento de la información. Estas visualizaciones están diseñadas para facilitar la interpretación de los resultados y, en caso necesario, apoyar la toma de decisiones tanto operativas como financieras. De esta manera, el análisis visual de los datos no solo proporcionará claridad sobre el estado del sistema, sino que también brindará una herramienta útil para la planificación y gestión eficiente de los recursos.

En ocasión a lo anterior, se realiza la construcción de diagramas de barras que permiten comparar y visualizar la siguiente información:

Cantidad de fallas por municipio, tipo de fallas, tiempo de duración por tipo de falla, tiempo de falla por municipio, energía no servida por tipo de falla, energía no servida por municipio, costo de energía no servida por tipo de falla y costo energía no servida por municipio. Además, se acompaña de etiquetas que permite totalizar los tiempos de falla, la cantidad de fallas, la energía no servida y el costo de la energía no servida. Finalmente, se utiliza un mapa con información georreferencia para visualizar la ubicación de los equipos más afectados en campo debido a las fallas.

Construcción Modelo de Datos

El modelo de datos está conformado por 3 tablas, “Datos_finales” que contiene la información operativa de las fallas ocurridas en el sistema eléctrico y que fue depurado en el software Python; “Transformadores” que contiene la información de ubicación georreferenciada y distribución por municipios de los equipos de red en campo; y “Tarifas” contiene la información del costo de la tarifa del servicio de energía eléctrica para mes del periodo bajo análisis. Estas 3 tablas se importan al software Power BI y para aprovechar su contenido se relacionando en un modelo entidad-relación de la siguiente forma:

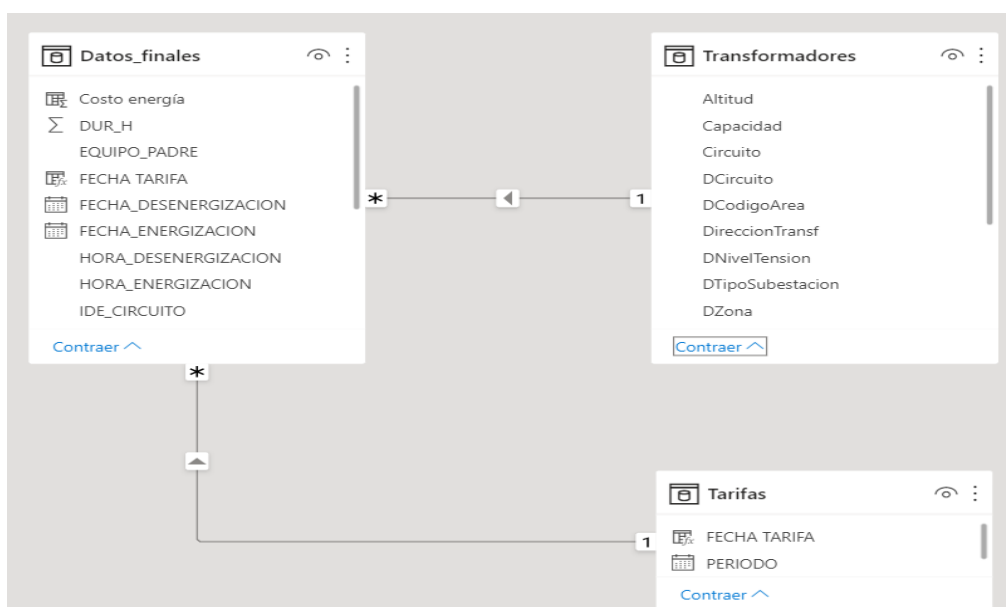
Relación uno a muchos entre las tablas Transformadores y Datos_finales a través de la variable NUM_NODO_TRANSFORMADOR

Relación uno a muchos entre las tablas Tarifas y Datos_finales a través de la variable FECHA TARIFA

Dicho entidad-relación se presenta en la Figura 13.

Figura 13

Modelo Entidad Relación

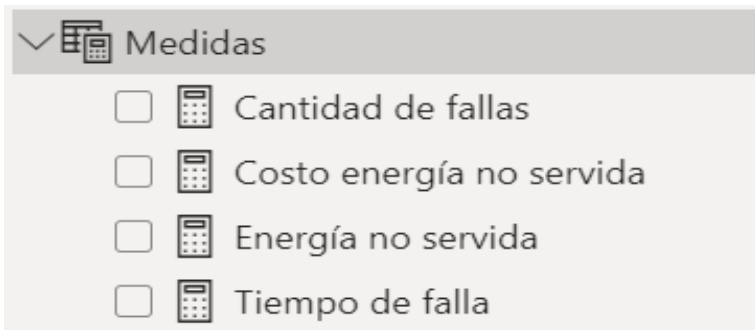


Construcción Expresiones DAX

En esta etapa, se crean las expresiones DAX queridas para el cálculo de las variables objeto de visualización antes mencionadas. Estas expresiones se muestran en la figura 14.

Figura 14

Expresiones DAX



Cantidad de fallas = `distinctCOUNT(Datos_finales[IDE_EVENTO])`.

Costo energía no servida = `sum(Datos_finales[Costo energía])`.

Energía no servida = `sum(Datos_finales[VLR_CONSUMO_NO_SUMINISTRADO])`.

Tiempo de falla =

`CALCULATE(SUMX(DISTINCT(Datos_finales[DUR_H]),Datos_finales[DUR_H]),Datos_finales[IDE_EVENTO])`

Además de las expresiones DAX para el cálculo de medidas, al interior de la tabla `Datos_finales` se crean columnas calculadas para ayudar con la construcción de las medidas.

Construcción de Visualizaciones

En esta etapa, se crean las visualizaciones para mostrar el comportamiento de las variables, las cuales se ayudan de filtros activos de fechas de ocurrencia de fallas y tipo de

duración con los cuales se pueden observar diferentes comportamientos del sistema eléctrico.

Algunas de dichas visualizaciones se muestran en las figuras 15 a 19.

Figura 15

Cantidad de Fallas por Municipio

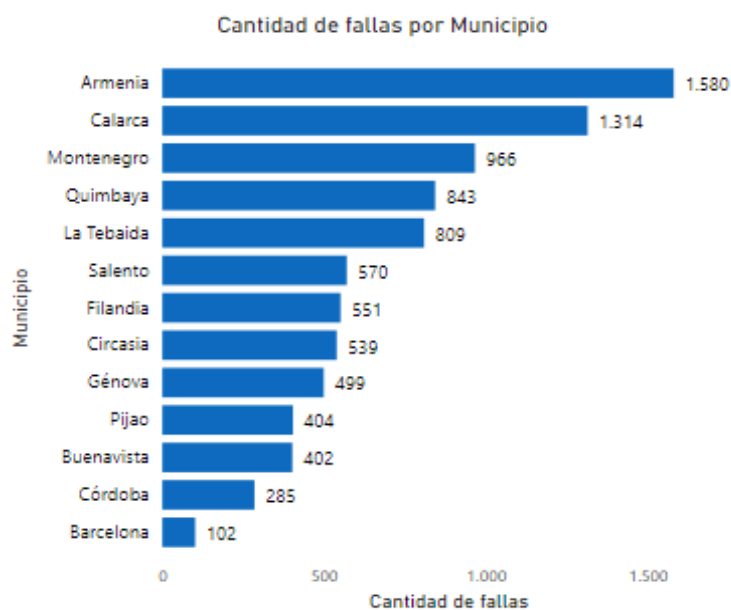


Figura 16

Tiempo de Interrupción por Tipo de Falla

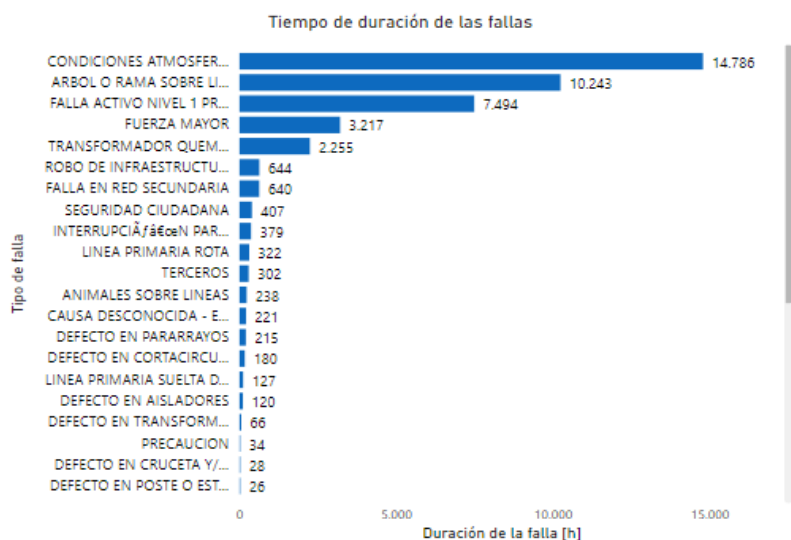


Figura 17*Total Costo Energía no Servida*

Costo energía no servida

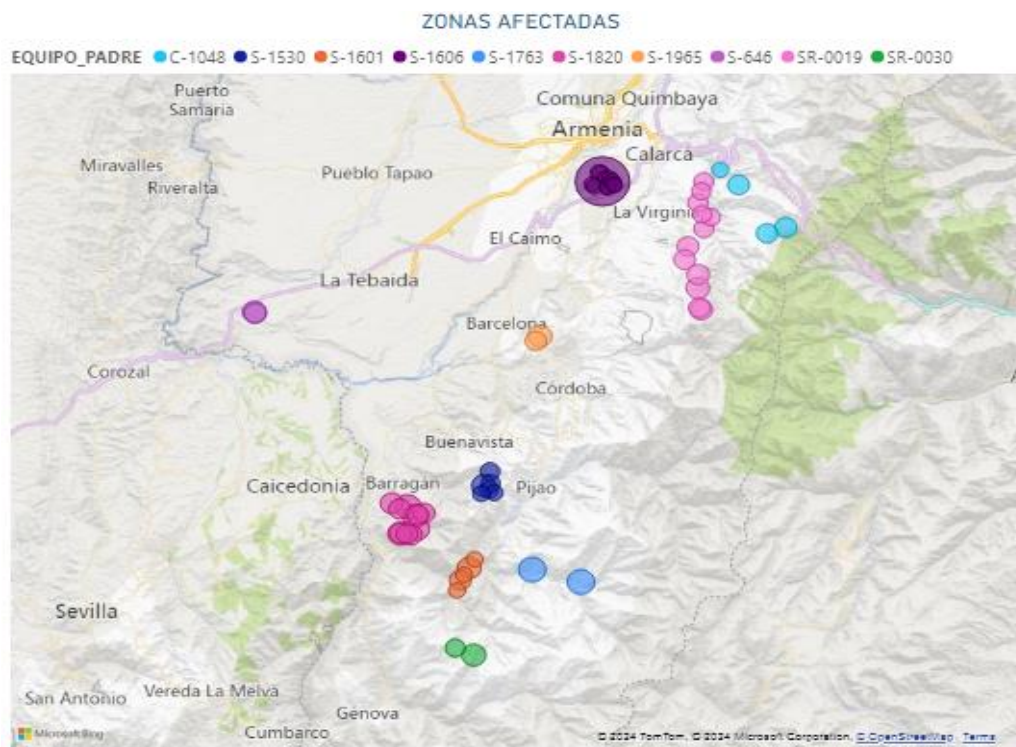
\$226.040.105

Figura 18*Filtro Activo de Fechas*

Fecha de la falla

24/05/2022  25/04/2023 



Figura 19*Zona Afectada por Fallas***Fase 5***Análisis de Resultados*

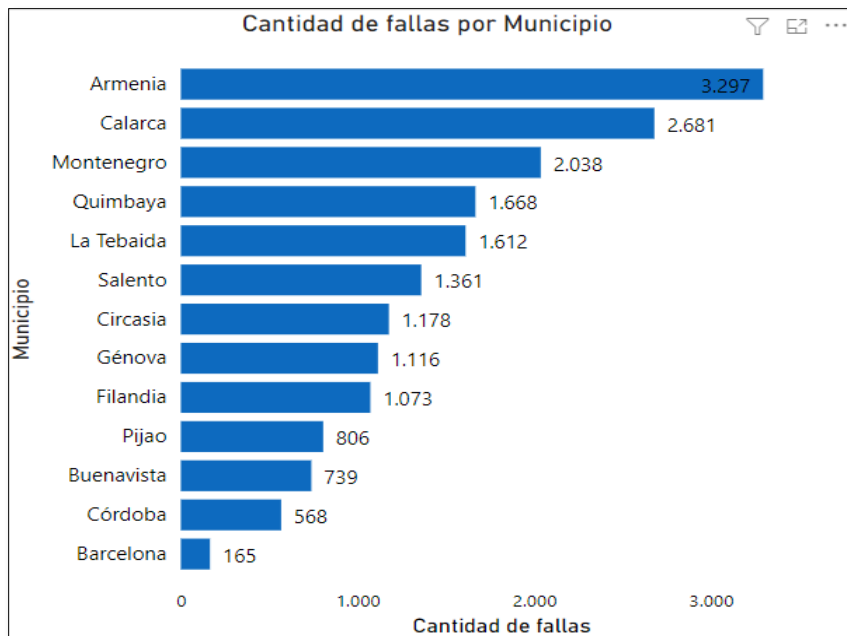
Para el análisis del impacto de las fallas en el sistema de distribución de energía eléctrica, se utilizó una base de datos proveniente del sistema de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA). Esta base de datos contiene 1.6 millones de registros, con un rango de fechas que abarca desde el 1 de enero de 2022 hasta el 23 de octubre de 2023.

El análisis se centró en los siguientes aspectos: cantidad de fallas, tiempo de interrupciones, energía no suministrada, costo de la energía no suministrada y zonas afectadas. A partir de estos datos, se obtuvieron los siguientes resultados:

Cantidad de fallas En esta etapa, se pudo evidenciar que, para el rango de fechas mencionado, se registraron un total de 12,308 fallas, las cuales se distribuyen en los diferentes municipios, como se muestra en la Figura 20.

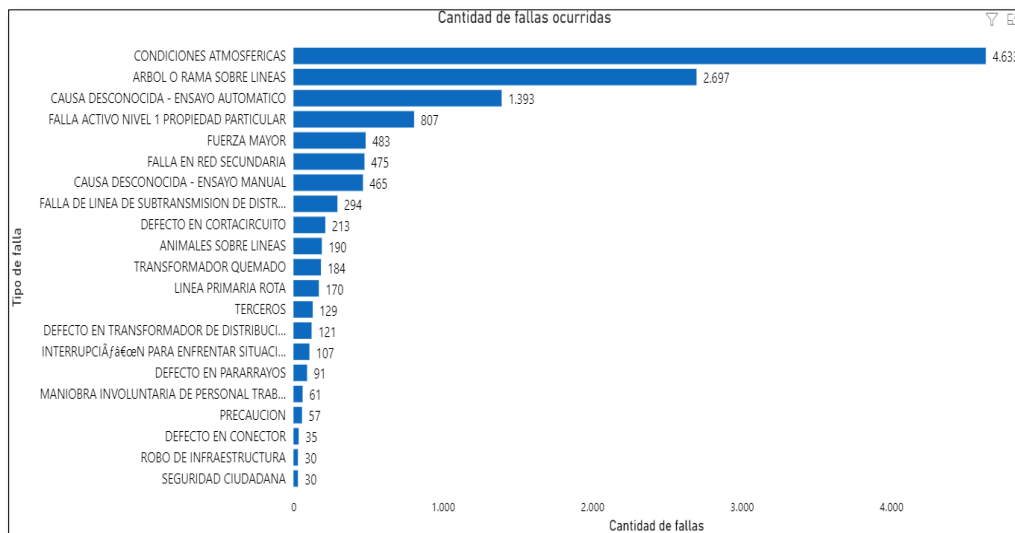
Figura 20

Cantida de Fallas por Municipio



De la gráfica anterior se puede determinar que los municipios que presentaron más fallas fueron Armenia, Calarcá, Montenegro y Quimbaya. Además, se observa que el corregimiento de Barcelona fue el menos afectado.

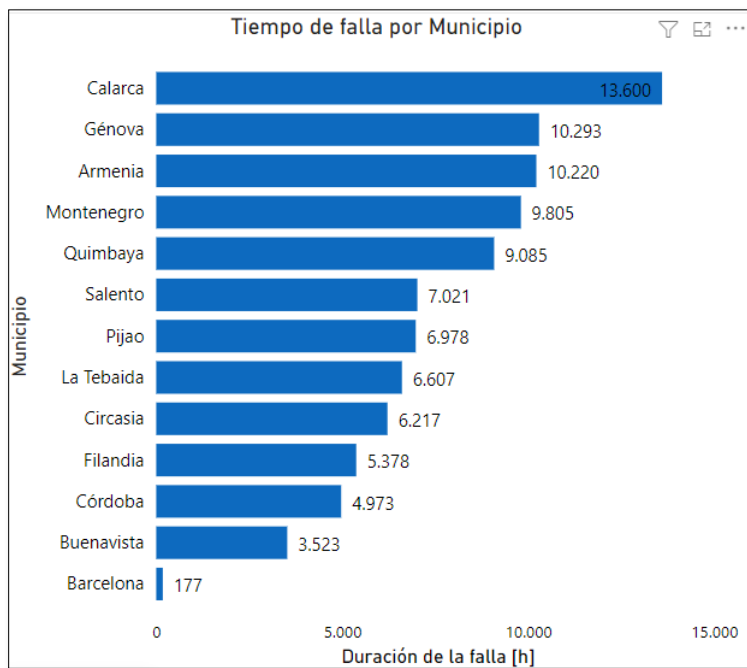
Con el fin de identificar la causa de estas fallas, se realizó un agrupamiento de los datos para clasificar los tipos de fallas, lo que permitió obtener una mayor claridad sobre la causa raíz de las interrupciones, de este agrupamiento se obtuvo la información registrada en la figura 21.

Figura 21*Tipos de Fallas*

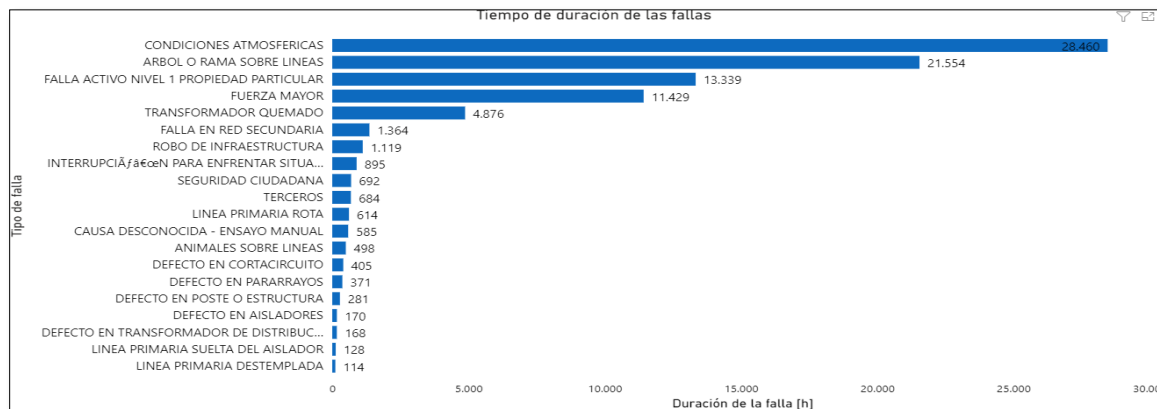
De esta gráfica se puede determinar que los tipos de falla que más afectan el sistema de distribución de energía eléctrica son las condiciones atmosféricas y los árboles o ramas sobre la línea. Entre estos dos tipos de fallas suman el 59.55% de las afectaciones totales.

Tiempos de interrupción: En esta etapa se realizó una agrupación de datos con el fin de identificar el municipio con más tiempo de falla y el tipo de falla que lo causó. A partir de este análisis, se pueden determinar los siguientes resultados:

Se identificó que los municipios con más tiempo de interrupciones son Calarcá, Génova, Armenia, Montenegro y Quimbaya, como se muestra en la Figura 22.

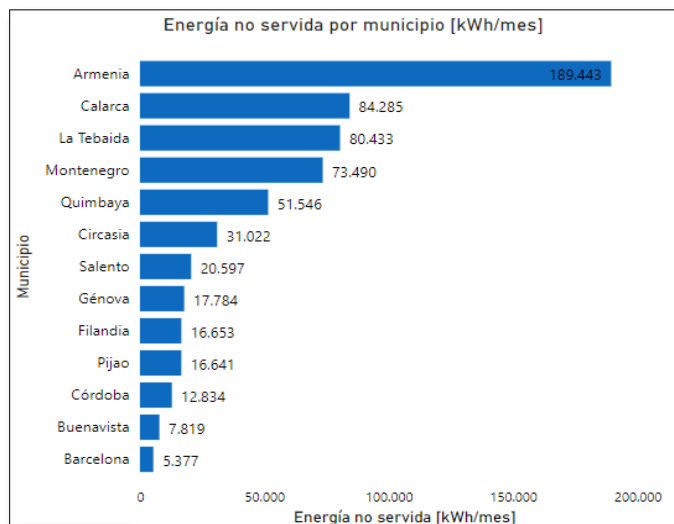
Figura 22*Tiempos de Falla por Municipios*

De esta misma manera, se realizó la segmentación de los datos con el fin de identificar cuales son los tipos de fallas que tiene mas participación por su tiempo de interrupción, de este análisis se obtuvo la figura 23.

Figura 23*Tiempo de Duración de Fallas*

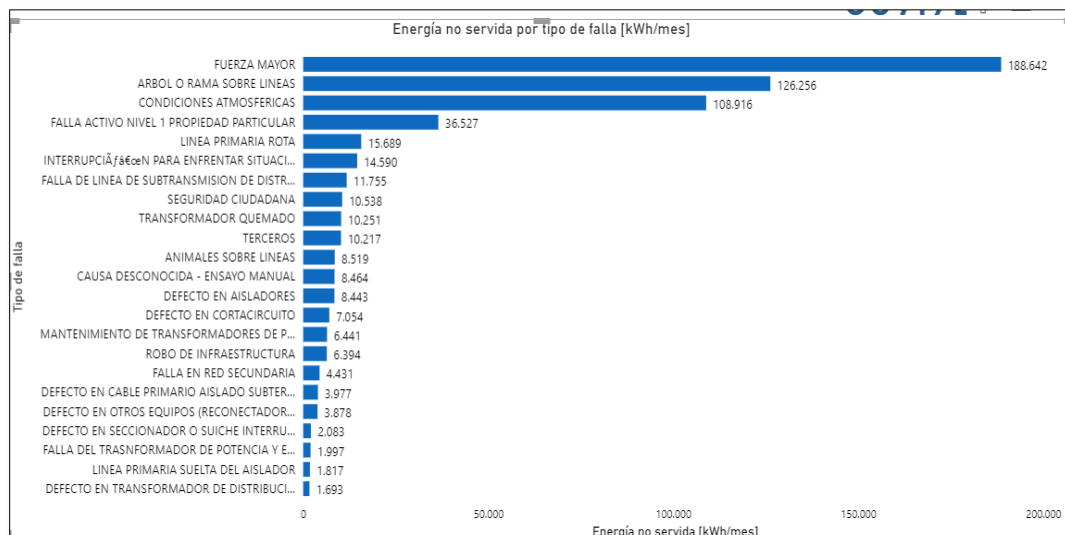
De la imagen anterior, se puede concluir que los principales tipos de fallas que afectan el suministro de energía eléctrica son: condiciones atmosféricas, presencia de árboles o ramas sobre la línea, fallas en el nivel 1 del sistema activo y causas de fuerza mayor. Estas fallas representan el 90% de las afectaciones al sistema.

Energía no Suministrada En esta fase se realizó una agrupación de datos, con el fin de conocer cual es el municipio que cuenta con mayor cantidad de energía no suministrada, después de realizar este análisis se obtuvo la información relacionada en la figura 24.

Figura 24*Energía no Suministrada por Municipio*

De la imagen anterior, se puede determinar que el municipio con la mayor cantidad de energía no servida es Armenia, con un total de 189,443 kWh/mes. Por otro lado, se observa que el corregimiento de Barcelona es el menos afectado. Es importante aclarar que estos datos son variables, ya que dependen de la cantidad de habitantes en cada municipio.

Con el fin de identificar el tipo de falla que representa un mayor impacto sobre la energía no suministrada, se realizó una segmentación de los datos según el tipo de falla, y la información obtenida se presenta en la figura 25.

Figura 25*Enería no Suministrada por Tipo de Falla*

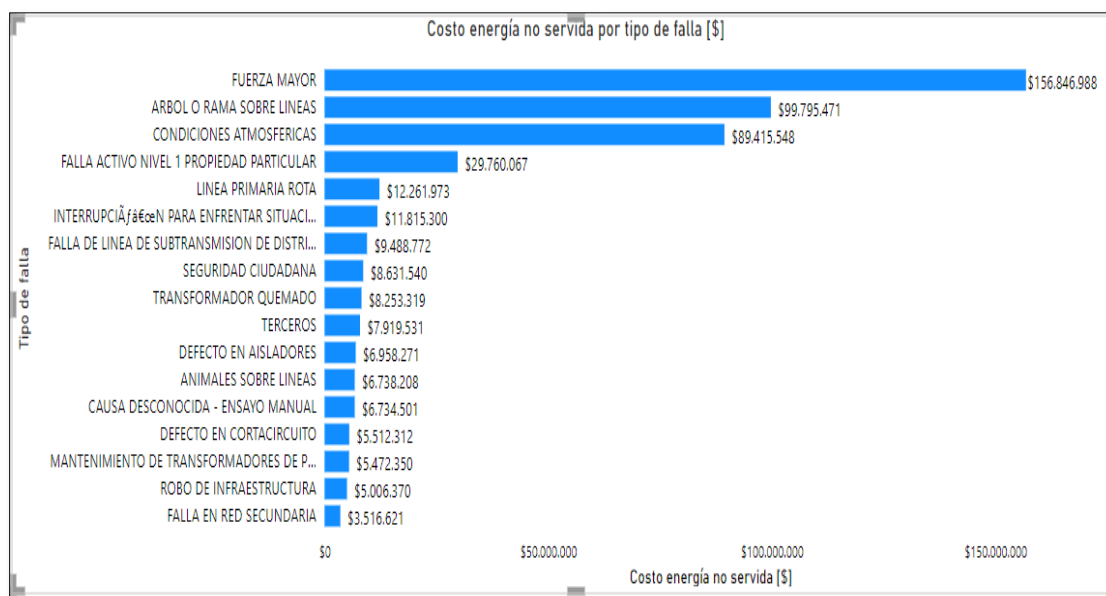
De este análisis, se observó que los tipos de fallas que tienen mayor impacto en la energía no servida son: fuerza mayor, árboles o ramas sobre las líneas, y condiciones atmosféricas. Estos factores representan el 69% de los 607,923 kWh/mes que no fueron vendidos.

Costo energía no suministrada Con el fin de tener un panorama con relación al costo de la energía no suministrada, se realizó un análisis a la base de datos y se cruzó con el costo de la tarifa para cada periodo de tiempo, donde se obtuvo la información relacionada en la figura 26.

Figura 26*Costo de Energía no Servida por Municipio*

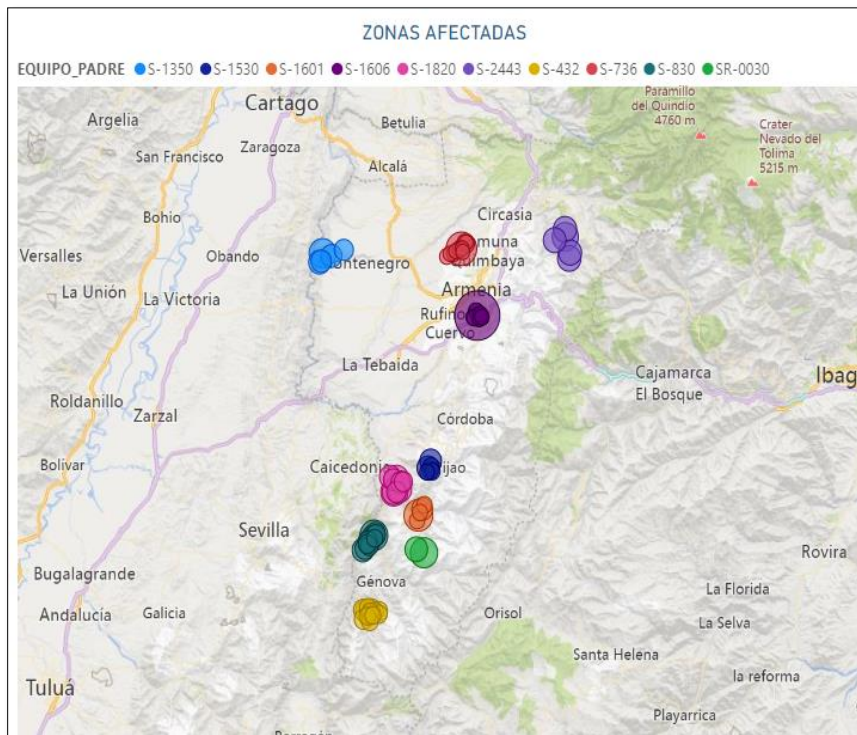
Del análisis realizado, se evidenció que el municipio con el costo de energía no servida más elevado es Armenia. Este valor corresponde al 32% de los \$493,562,807, que es el total del costo de la energía no servida.

Por otra parte, se realizó un análisis con el fin de identificar cual es el tipo de falla que tiene una mayor participación en relación con el costo de a energía no servida, de este análisis se obtuvo los resultados relacionados en la figura 27.

Figura 27*Costo de Energía no Servida por Tipo de Falla*

De esta figura se puede determinar que los tipos de falla asociados al mayor costo de energía no servida son: fuerza mayor, caída de árboles o ramas sobre las líneas y condiciones atmosféricas. Estas fallas son las más representativas en términos financieros.

Zonas con Afectación En esta fase, se realizó una segmentación de datos con el objetivo de identificar los equipos principales con mayor cantidad de fallas registradas. Una vez identificados los elementos con más afectaciones, se distribuyeron geográficamente utilizando sus coordenadas. Como resultado de este ejercicio, se obtuvo la Figura 28.

Figura 28*Zonas Afectadas*

Además, se realizó un filtro con el que es posible identificar los tipos de fallas que afectan cada uno de los elementos padres, para este caso, se tomó el equipo padre S-1350, del cual se identificó que las fallas que afectan esta zona son las relacionadas en la figura 29.

Figura 29*Fallas Zonas*

Tipo de falla	Duración de la falla [h]
CONDICIONES ATMOSFERICAS	202,47
TRANSFORMADOR QUEMADO	128,76
FUERZA MAYOR	108,04
DEFECTO EN PARARRAYOS	92,56
ARBOL O RAMA SOBRE LINEAS	51,63
LINEA PRIMARIA ROTA	2,02
ANIMALES SOBRE LINEAS	1,30
FALLA ACTIVO NIVEL 1 PROPIEDAD PARTICULAR	0,65
CAUSA DESCONOCIDA - ENSAYO MANUAL	0,49
DEFECTO EN AISLADORES	0,26
Total	588,04

De esta manera, se pudo identificar que la falla que más afecta la zona del S-1320 son las descargas atmosféricas, con una duración de 202,47 horas. En segundo lugar, se encuentra la falla por transformador quemado, con un tiempo de 128,56 horas. La tercera falla más representativa corresponde a la asociada a fuerza mayor, con un total de 108,04 horas.

Finalmente, se realizó una agrupación por tipo de duración de las fallas, definiendo los siguientes criterios: los eventos de corta duración corresponden a las fallas con tiempos inferiores a 10 minutos; los eventos de media duración son aquellas fallas con tiempos mayores a 10 minutos y menores a 1 hora; por último, se definieron las fallas de larga duración como aquellas registradas con tiempos superiores a 1 hora.

Para la zona del S-1350, se obtuvo como fallas de corta duración, las fallas registradas en la figura 30.

Figura 30*Fallas Corta Duración*

Tipo de falla	Duración de la falla [h]
ARBOL O RAMA SOBRE LINEAS	1,36
CONDICIONES ATMOSFERICAS	1,14
CAUSA DESCONOCIDA - ENSAYO MANUAL	1,10
FUERZA MAYOR	0,35
FALLA DE LINEA DE SUBTRANSMISION DE DISTRIBUCIÓN	0,32
CAUSA DESCONOCIDA - ENSAYO AUTOMATICO	0,12
DEMORA EN EL CIERRE POR FALLA DE COMUNICACIONES CON EL PERSONAL DE OPERACIÓN (SDL/STR).	0,11
DEFECTO EN PARARRAYOS	0,05
PRECAUCION	0,02
ANIMALES SOBRE LINEAS	0,01
Total	3,19

De igual manera, se identificaron las fallas de mediana duración para la zona del S-1350 y se obtuvo la información relacionada en la figura 31.

Figura 31*Fallas de Mediana Duración*

Tipo de falla	Duración de la falla [h]
ARBOL O RAMA SOBRE LINEAS	3,63
TRANSFORMADOR QUEMADO	0,91
DEFECTO EN PARARRAYOS	0,88
CONDICIONES ATMOSFERICAS	0,76
LINEA PRIMARIA ROTA	0,73
FALLA ACTIVO NIVEL 1 PROPIEDAD PARTICULAR	0,65
CAUSA DESCONOCIDA - ENSAYO MANUAL	0,35
DEFECTO EN AISLADORES	0,26
Total	8,17

Finalmente , se realizo la agrupación de las fallas de larga duración asociadas a la zona del S-1350 y se obtuvo la información ilustrada en la figura 32.

Figura 32

Fallas de Larga Duración

Tipo de falla ▲	Duración de la falla [h] ▼
CONDICIONES ATMOSFERICAS	200,54
TRANSFORMADOR QUEMADO	127,85
FUERZA MAYOR	107,74
DEFECTO EN PARARRAYOS	91,68
ARBOL O RAMA SOBRE LINEAS	47,87
ANIMALES SOBRE LINEAS	1,30
LINEA PRIMARIA ROTA	1,29
Total	578,26

De este análisis se concluye que las fallas con mayor impacto en la prestación del servicio son las causadas por condiciones atmosféricas y la caída de árboles o ramas sobre las líneas. En cambio, los transformadores quemados y los casos de fuerza mayor son situaciones más fortuitas y de menor incidencia.

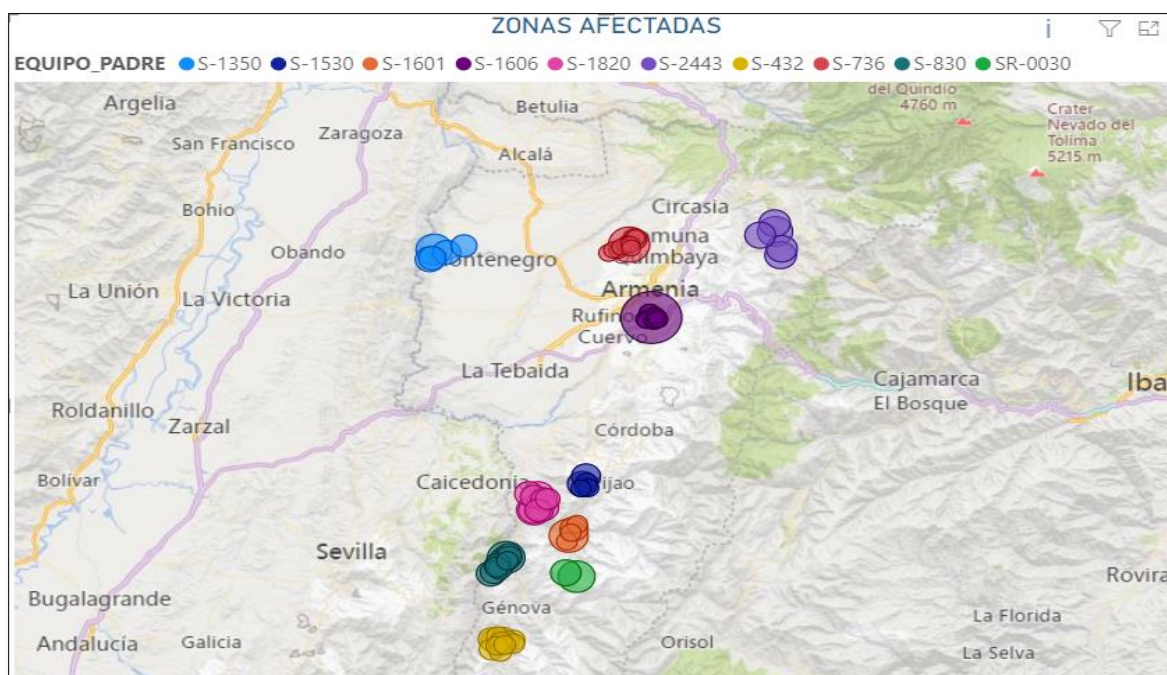
Propuesta del Plan de Mantenimiento

Después de realizar diversos análisis y agrupaciones en la base de datos de estudio, se identificaron varias condiciones clave que serán fundamentales para la toma de decisiones operativas y financieras. Estas condiciones servirán como base para la propuesta del plan de mantenimiento.

A partir de este análisis, se presenta la siguiente información como parte de la propuesta para el plan de mantenimiento: el Top 10 de las zonas del sistema eléctrico con mayor número de afectaciones, que se muestran en la figura 33.

Figura 33

Zonas con mas Afectaciones



Esta información facilita el trabajo al permitirnos identificar las zonas en las que concentramos nuestros esfuerzos operativos para mejorar la calidad del servicio. A continuación,

se detallan los tipos de fallas que tienen un mayor porcentaje de incidencia en las zonas mencionadas. Los resultados de este análisis se presentan en la figura 34.

Figura 34

Tipos de Fallas en Zonas mas Afectadas

Tipo de falla	Duración de la falla [h]
CONDICIONES ATMOSFERICAS	28.459,87
ARBOL O RAMA SOBRE LINEAS	21.554,28
FALLA ACTIVO NIVEL 1 PROPIEDAD PARTICULAR	13.339,21
FUERZA MAYOR	11.429,49
TRANSFORMADOR QUEMADO	4.876,09
FALLA EN RED SECUNDARIA	1.364,13
ROBO DE INFRAESTRUCTURA	1.119,38
INTERRUPCIÓN PARA ENFRENTAR SITUACIONES DE RIESGO DE LA VIDA HUMANA	895,12
SEGURIDAD CIUDADANA	692,09
TERCEROS	683,60
Total	80.202,17

A partir de la información anterior, podemos concluir que los tipos de fallas más frecuentes son las condiciones atmosféricas, la presencia de árboles o ramas sobre la línea, y las fallas de nivel 1 en propiedad particular, las cuales representan el 79 % de la duración total de las fallas. Esto resalta la necesidad de desarrollar estrategias operativas que contribuyan a reducir la frecuencia con la que estas fallas ocurren. Al implementar estas estrategias, se logrará disminuir la brecha de la energía no servida, lo que beneficiará financieramente a la empresa. En este contexto, se propone el siguiente plan de mantenimiento:

Falla, condiciones atmosféricas: Para este caso, se propone realizar un diagnóstico eléctrico mediante el uso de drones, lo que nos permitirá obtener un estado detallado de las estructuras. Con esta información, será posible tomar decisiones sobre la instalación de cables de

guarda y DPS de línea. Esta modificación contribuirá a apantallar las redes de distribución, reduciendo de manera significativa las salidas de servicio causadas por este factor.

Falla, Árbol o rama sobre líneas: Con respecto a esta falla, se propone realizar un diagnóstico forestal mediante el uso de drones, lo que nos permitirá identificar los tramos de la red que están en contacto con vegetación. De esta manera, podremos programar de manera eficiente actividades de poda o tala, según las necesidades específicas de cada tramo, para evitar futuros inconvenientes.

Falla, fallas de nivel 1 en propiedad particular: Para este caso, se propone crear un procedimiento en la página web que permita al titular de estos activos solicitar la reposición del transformador, autorizando la modificación en la tarifa conforme a la resolución correspondiente.

Conclusiones

Se puede apreciar que del top 10 de las fallas más recurrentes la mayoría son de origen externo, es decir, que no están relacionadas con las condiciones u operación del sistema de distribución de energía sino con la ubicación del mismo, por lo tanto, las acciones de mitigación deben estar más enfocadas en poda de especies forestales y blindaje para evitar el acercamiento de la fauna.

El mantenimiento del sistema de distribución de energía eléctrica debe priorizar aquellas zonas que representen un mayor costo de energía no suministrada, ya que esto indica que son las áreas donde la empresa experimenta pérdidas significativas debido a la incapacidad de suministrar energía y, por ende, dejar de percibir el ingreso correspondiente. Al focalizar los esfuerzos de mantenimiento en estas zonas, se puede reducir el impacto económico asociado a la interrupción del servicio, mejorar la eficiencia operativa y optimizar los ingresos de la empresa.

A partir del análisis de la información recopilada, se ha determinado que el tipo de falla que tiene mayor incidencia son aquellas relacionadas con las condiciones atmosféricas, este tipo de fallas afecta significativamente la continuidad del servicio y los indicadores de calidad, por lo tanto, es fundamental enfocar los esfuerzos operativos y las inversiones financieras en este aspecto, con el objetivo de mitigar su impacto. Para lograrlo, se deben priorizar acciones como la mejora de la infraestructura, específicamente mediante la implementación de cables guarda y dispositivos de protección (DPS) en las líneas, lo que contribuirá a mejorar la resiliencia del sistema y garantizar la estabilidad del servicio frente a condiciones climáticas adversas.

Recomendaciones del Trabajo Realizado

Dado que los indicadores de calidad establecidos por la Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG son cada vez más exigentes, es importante que los operadores de redes de distribución de energía eléctrica implementen metodologías para analizar los impactos que generan las fallas sobre sus sistemas de distribución, de tal forma que les permitan implementar estrategias de mitigación que optimicen costos y energía dejada de suministrar en aras de mejorar la calidad del servicio que perciben los usuarios.

El estudio realizado muestra que los sistemas de distribución de energía eléctrica presentan fallas no solo por sus condiciones técnicas, también tienen una fuerte influencia de aspectos externos como condiciones atmosféricas, la presencia de individuos forestales y la intrusión de terceros, por lo tanto, es importante considerar estos aspectos al momento de realizar el diseño y el planeamiento de los nuevos sistemas de distribución para que estos tengan menor incidencia en las fallas de las redes de energía.

En los sistemas de distribución de energía eléctrica se presentan fallas de corta duración (inferiores a 10 minutos) que pueden parecer sin importancia, sin embargo, se puede evidenciar que dichas fallas tienen una participación importante en cuanto a la cantidad de eventos que se presentan, por lo que es necesario hacer gestión sobre estas ya que pueden llegar a generar incumplimiento a los indicadores de calidad los cuales tienen impactos financieros en la organización, tanto por ingresos dejados de percibir por energía no suministrada como por penalizaciones económicas debido a cortes de energía repetitivos sobre los clientes.

Referencias Bibliográficas

Academia, U. (10 de 02 de 2024). Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Obtenido de

Universidad Nacional Abierta y a Distancia:

<https://academia.unad.edu.co/investigacion-y-productividad-ecbti/lineas>

Akram, M. W. (2022). *Failures of Photovoltaic modules and their Detection: A Review.*

Applied Energy.

Bjelić, M. (2022). Machine learning for power transformer SFRA based fault detection.

International Journal of Electrical Power & Energy Systems.

CREG. (05 de 2008). Ariae. Obtenido de Ariae: [https://www.ariae.org/sites/default/files/2017-](https://www.ariae.org/sites/default/files/2017-05/distribucion_energ_electrica.pdf)

[05/distribucion_energ_electrica.pdf](https://www.ariae.org/sites/default/files/2017-05/distribucion_energ_electrica.pdf)

CREG. (2018 de 01 de 2018). GESTOR NORMATIVO - ALEJANDRIA. Obtenido de

[https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0015_2018.ht](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0015_2018.htm)

[m](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0015_2018.htm)

CREG. (29 de 01 de 2018). Gestor normativo CREG. Obtenido de Gestor normativo CREG:

[https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0015_2018.ht](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0015_2018.htm)

[m](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0015_2018.htm)

Enel. (07 de 06 de 2023). Obtenido de [https://www.enel.com.co/es/historias/a202306-fallas-](https://www.enel.com.co/es/historias/a202306-fallas-redes-electricas-causas-y-soluciones.html)

[redes-electricas-causas-y-soluciones.html](https://www.enel.com.co/es/historias/a202306-fallas-redes-electricas-causas-y-soluciones.html)

Enel. (22 de 01 de 2024). Trabajamos por un servicio de calidad, conoce cómo lo hacemos.

Obtenido de Trabajamos por un servicio de calidad, conoce cómo lo hacemos:

master, t. f. (23 de 03 de 2020). biblus.us.es. Obtenido de biblus.us.es: chrome-

[extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abr](https://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/70003/fichero/Trabajo+Fin+Master.pdf)

[eprroy/70003/fichero/Trabajo+Fin+Master.pdf](https://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/70003/fichero/Trabajo+Fin+Master.pdf)

normativa, S. u. (26 de 05 de 2015). Suinjuriscol. Obtenido de Suinjuriscol: <https://www.suinjuriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Decretos/30019920>

S.A, E. (2018). ENEL. Obtenido de ENEL: <https://www.enel.com.co/es/historias/a202306-fallas-redes-electricas-causas-y-soluciones.html>

Santiago, E. (01 de 2019). *Scielo*. Obtenido de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0250-71612019000100259

Sostenible, M. d. (07 de 10 de 2021). miniambiente. Obtenido de miniambiente: <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-1060-de-2021/>

Superserviicios. (14 de 05 de 2024). Superintendencia de servicios publicos domiciliarios. Obtenido de Superintendencia de servicios publicos domiciliarios: <https://www.superservicios.gov.co/Normativa>

UNAD, E. (10 de 01 de 2024). Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Obtenido de Universidad Nacional Abierta y a Distancia: <https://estudios.unad.edu.co/opcion-de-grado-especializacion>

UNAD. (s.f.). Obtenido de <https://academia.unad.edu.co/investigacion-y-productividad-ecbti/lineas>

Verena Mercado Polo, o. B. (2017). *Ciencia ingenieria*. Obtenido de Ciencia ingenieria: <https://www.redalyc.org/journal/5075/507555007009/html/>

Zuñiga, J. d. (22 de 01 de 2020). *Dialnet Plus*. Obtenido de Dialnet Plus: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8263451>