



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD

EVALUACIÓN DE LA RESILIENCIA DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE ECUDOR ANTE INCENDIOS FORESTALES

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO**

AUTORES:

Maldonado Quiñonez David Alejandro

Simbaña Iza Jeremy Sebastián

TUTOR:

Ing. Wilian Patricio Guamán Cuenca M.Sc.

COTUTOR:

Dr. Alex Villamarín Jácome

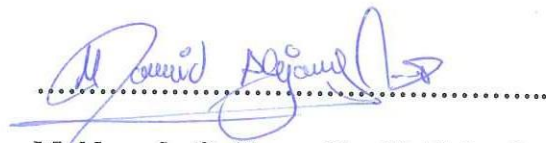
Latacunga, abril 2024

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, **MALDONADO QUIÑONEZ DAVID ALEJANDRO** con C.C: 1726327560 y **SIMBAÑA IZA JEREMY SEBASTIAN** con C.C: 1726183096, declaramos ser los autores del presente proyecto de Investigación: “**EVALUACIÓN DE LA RESILIENCIA DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE ECUADOR ANTE INCENDIOS FORESTALES**”, siendo el Ing. **Wilian Patricio Guamán Cuenca M.Sc.**, tutor del presente trabajo y Dr. **Alex Villamarín Jácome** Cotutor; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo Investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Atentamente,



Maldonado Quiñonez David Alejandro

C.C. 1726327560



Simbaña Iza Jeremy Sebastián


C.C. 1726183096

AVAL DEL TUTOR

En calidad del Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

“EVALUACIÓN DE LA RESILIENCIA DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE ECUADOR ANTE INCENDIOS FORESTALES”, de los estudiantes **Maldonado Quiñonez David Alejandro** y **Simbaña Iza Jeremy Sebastián**, de la carrera de Ingeniería en Electricidad, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científicos-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Honorable Consejo Académico de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, agosto 2024



.....
Ing. Wilian Patricio Guamán Cuenca M.Sc.

Tutor

C.C. 0603578956

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulantes: **Maldonado Quiñonez David Alejandro** con cedula de ciudadanía **C.C: 1726327560** y **Simbaña Iza Jeremy Sebastián** con cedula de ciudadanía **C.C: 1726183096**, con el título de Proyecto de titulación: **“EVALUACIÓN DE LA RESILIENCIA DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE ECUADOR ANTE INCENDIOS FORESTALES”**, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Latacunga, agosto 2024

Para constancia firman:

.....
Ing. Rueda Flores Walter Paúl M.Sc.

C.C. 050368989-5

LECTOR 1 (PRESIDENTE)

.....
Ing. Proaño Maldonado Xavier Alfonso M.Sc.

C.C. 050265642-4

LECTOR 2 (MIEMBRO)

.....
Ing. Mullo Pallo Mauricio Eduardo M.Sc.

C.C. 050375518-3

LECTOR 3 (MIEMBRO)

ÍNDICE GENERAL

1. INFORMACIÓN GENERAL.....	1
2. INTRODUCCIÓN	3
2.1. PROBLEMA	3
2.1.1. Situación Problémica.....	3
2.1.2. Formulación del problema	5
2.2. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN.....	5
2.3. JUSTIFICACIÓN.....	5
2.4. BENEFICIARIOS	6
2.4.1. Beneficiarios Directos	6
2.4.2. Beneficiarios Indirectos.....	6
2.5. OBJETIVOS	6
2.5.1. General	6
2.5.2. Específicos	6
2.6. HIPÓTESIS Y SISTEMAS DE TAREAS	7
2.6.1. HIPÓTESIS	7
2.6.2. SISTEMA DE TAREAS	7
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	8
3.1. ANTECEDENTES	9
3.2. RESILIENCIA DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS	12
3.3. INCENDIOS FORESTALES	16
3.3.1. Causas de los incendios forestales	16
3.3.2. Efectos de los incendios forestales.....	16
3.3.3. Parámetros de incendios forestales	17
3.4. INCENDIOS FORESTALES EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS	20

3.5. MODELOS DE INCENDIOS FORESTALES	24
3.6. ESTRATEGIAS PARA MITIGAR INCENDIOS FORESTALES EN SISTEMAS ELÉCTRICOS.....	26
4. METODOLOGÍA	29
4.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE la metodología	29
4.2. ETAPA DE CARACTERIZACIÓN	30
4.2.1. Caracterización del sistema eléctrico	30
4.2.2. Caracterización del evento	31
4.3. ETAPA DE evaluación.....	31
4.3.1. Parametrización del evento	31
4.3.2. Modelación de falla.....	37
4.3.3. Respuesta del sistema eléctrico	39
4.4. ETAPA DE FORTALECIMIENTO	42
4.4.1. EVALUACIÓN DE ESTRATEGIAS DE MEJORA	42
4.5. caso de estudio.....	43
4.5.1. RED DE PRUEBA.....	44
4.5.2. DELIMITACIÓN CASO DE ESTUDIO.....	49
4.5.3. ESCENARIOS DEL CASO DE ESTUDIO	50
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	54
5.1. RESULTADOS DE LA PROBABILIDAD DE FALLA.....	54
5.1.1. ESCENARIO 1: L/T ADELCA – EL OBRAJE	54
5.1.2. ESCENARIO 2: L/T SANTA ROSA – EL OBRAJE	56
5.1.3. ESCENARIO 3: DESCONEXIÓN L/T PAPALLACTA – PAPALLACTA MÓVIL	57
5.1.4. ESEENARIO 4: DESCONEXIÓN L/T MIRADOR ALTO – CONOCOTO / MIRADOR ALTO – SANTA ROSA	58
5.2. RESULTADOS DE LAS MÉTRICAS DE RESILIENCIA	59

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	61
6.1. CONCLUSIONES.....	61
6.2. RECOMENDACIONES	62
7. REFERENCIAS	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Comportamiento de resiliencia de un sistema eléctrico, curva trapezoidal asociada a evento perturbador. Tomado de [16].	13
Figura 3.2 Parámetros determinantes para evolución de incendios. Tomado de [25].	18
Figura 3.3 Humo afectando a las líneas e infraestructura de subestación [21].	21
Figura 3.4 Incendio forestal afectando a línea y elementos de distribución [21].	22
Figura 4.1 Metodología del proyecto.	30
Figura 4.2 Ubicación de torres de transmisión en Google Earth.	33
Figura 4.3 Mapa de temperatura por regiones del Ecuador. Tomado de [47].	35
Figura 4.4 Distribución de datos históricos de Velocidad del viento	36
Figura 4.5 Curva normalizada de datos para simulación Montecarlo	37
Figura 4.6 Disponibilidad de elementos eléctricos tras ocurrir un evento. Tomado de [48]	39
Figura 4.7 Perfil de demanda Sistema Eléctrico de Ecuador.	44
Figura 4.8 Perfil de demanda de S/E Olímpico a S/E Granda centeno	46
Figura 4.9 Perfil de demanda de S/E Gualo a S/E Carolina	46
Figura 4.10 Perfil de demanda de S/E Alangasí a S/E Los Bancos	47
Figura 4.11 Perfil de demanda de S/E Pérez Guerrero a S/E Adelca	47
Figura 4.12 Datos de la red de prueba en software DIgSILENT Power Factory	48
Figura 4.13 Simulación de la red de prueba en software DIgSILENT Power Factory	48
Figura 4.14 Registros históricos de incendios forestales que afectara la red eléctrica de Quito	49
Figura 5.1 Disponibilidad de L/T Adelca-El Obraje	55
Figura 5.2 Disponibilidad de L/T Santa Rosa-El Obraje	57
Figura 5.3 Disponibilidad de L/T Papallacta-Papallacta Móvil	58
Figura 5.4 Disponibilidad de L/t Mirador Alto – Conocoto / Mirador Alto – Santa Rosa .	59
Figura 5.5 Deslastre de carga por salida de L/T	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Sistema de tareas.	7
Tabla 3.1 Aportes a investigación de resiliencia de sistemas de energía eléctrica ante incendios forestales.	11
Tabla 3.2 Métricas de resiliencia para un sistema eléctrico [18].	15
Tabla 3.3 Causas principales de los incendios forestales.	16
Tabla 3.4 Efectos de incendios forestales en países con alto impacto de estos eventos.	17
Tabla 3.5 Parámetros físicos y ambientales para modelar un incendio forestal.....	19
Tabla 3.6 Impacto histórico de incendios forestales en diversos sectores de sistemas eléctricos.....	23
Tabla 4.1 Datos requeridos para modelar la red eléctrica en un software de sistemas de potencia.	31
Tabla 4.2 Altura de torres de transmisión de acuerdo con el nivel de voltaje [43].	33
Tabla 4.3 Datos típicos de longitud de la llama en función del tipo de combustible y velocidad del viento.	34
Tabla 4.4 Valores de índice de aridez de acuerdo con el tipo de clima y vegetación [46]..	34
Tabla 4.5 Velocidad del viento con tendencia más probable	37
Tabla 4.6 Coeficientes para cálculo del logaritmo [26].	38
Tabla 4.7 Demanda de la red de prueba en escenario de día laboral.....	45
Tabla 4.8 Registros históricos de incendios forestales que afectaron la red eléctrica de Quito	50
Tabla 4.9 Líneas de transmisión para caso de estudio.....	50
Tabla 4.10 Pendiente de cada tramo de la L/T Adelca – El obraje	51
Tabla 4.11 Longitud de llama en escenario L/T Papallacta-Papallacta Móvil.....	52
Tabla 4.12 Velocidad del viento para escenarios del caso de estudio.....	53
Tabla 5.1 Probabilidad de falla de la L/T Adelca – El obraje	55
Tabla 5.2 Probabilidad de falla de la L/T Santa Rosa – El obraje.....	56
Tabla 5.3 Probabilidad de falla de la L/T Santa Rosa – El obraje.....	57
Tabla 5.4 Resultados de la comparación entre las métricas de resiliencia para cada escenario.	60

NOMECLATURA

Conjuntos e índices

OB Conjunto de barras

OL Conjunto ramales

T Conjunto de horas

i Índice del conjunto de barras

i, j Índice del conjunto de ramales

t Índice del conjunto de horas

Parámetros

$Sbase$ Potencia base del sistema

$Theta$ Límite de ángulo de cada ramal

$Cens$ Costo de energía no suministrada

$Nombre_i$ Nombre de las barras

Tb_i Tipo de barra que depende del ángulo en la barra

$V0_i$ Voltaje inicial en la barra i

$th0_i$ Ángulo inicial de la barra i

$Pd_{i,t}$ Potencia activa de demanda en la barra en el periodo t .

$Pg0_i$ Potencia activa inicial de cada barra

Vg_i Voltajes en las barras de generación

$Vmax_i$ Límite superior de voltaje

$Vmin_i$ Límite inferior de voltaje en la barra

$Pgmin_i$ Límite inferior de potencia de generación

$Pgmax_i$ Límite superior de potencia de generación

C_i Costo de generación

$Ug_{i,t}$	Disponibilidad de Generación en el periodo T.
Af_i	Factor de disponibilidad de la generación.
$Tr_{i,j}$	Tipo de ramal
$r_{i,j}$	Resistencia del ramal
$x_{i,j}$	Reactancia del ramal
$a_{i,j}$	Relación de transformación del ramal
$amax_{i,j}$	Límite superior de la toma del ramal
$amin_{i,j}$	Límite inferior de la toma del ramal
$fi_{i,j}$	Ángulo de desfase del ramal
$Smax_{i,j}$	Cargabilidad del ramal
$g_{i,j}$	Conductancia del ramal
$b_{i,j}$	Susceptancia del ramal
$UL_{i,j,t}$	Disponibilidad de la línea en el periodo T

Variables

$V_{i,t}$	Variable de voltaje generado en cada barra
$th_{i,t}$	Variable de ángulo de voltaje generado en cada barra
$Pg_{i,t}$	Variable de potencia activa en cada barra
$Pa_{i,t}$	Variable de flujo de potencia activa de salida en el ramal
$Per_{i,t}$	Variable de pérdidas
$Pns_{i,t}$	Variable de energía no suministrada

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADAS

TITULO: “EVALUACIÓN DE LA RESILIENCIA DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE ECUADOR ANTE INCENDIOS FORESTALES”

Autores:

Maldonado Quiñonez David Alejandro

Simbaña Iza Jeremy Sebastián

RESUMEN

La creciente ocurrencia de amenazas naturales meteorológicas, como incendios forestales, ciclones e inundaciones, representa un riesgo significativo para la continuidad del suministro de energía eléctrica. Aunque estos eventos son relativamente raros, sus efectos pueden ser extremadamente severos, lo que destaca la importancia de evaluar y mitigar su impacto. En este contexto, es esencial incorporar el concepto de resiliencia en el sistema eléctrico para comprender su capacidad de resistir, recuperarse y adaptarse frente a eventos disruptivos de alto impacto y baja probabilidad. Este trabajo se centra en la evaluación y el fortalecimiento de la resiliencia del sistema de transmisión de Ecuador ante incendios forestales. Para esto, se propone un marco metodológico en varias etapas para caracterizar incendios forestales, evaluar su impacto en los componentes de las redes eléctricas, y analizar la respuesta del sistema. Además, se identifican estrategias para mitigar el impacto de estos eventos y fortalecer la resiliencia del sistema de transmisión. Este trabajo utiliza un modelo novedoso para caracterizar incendios forestales, considerando parámetros físicos y ambientales, así como un modelo especializado de resiliencia para calcular la probabilidad de falla en conductores de líneas aéreas debido a incendios. Además, se incorpora un modelo de optimización de flujo de potencia óptimo en corriente directa (OPF-DC) con pérdidas, implementado en AMPL, para evaluar la respuesta del sistema. Las métricas de resiliencia utilizadas incluyen la energía no suministrada (ENS), EIU y las métricas FLEP derivadas de la curva conceptual del trapecioide de resiliencia. La metodología propuesta se aplica a un caso de estudio real, utilizando datos de la Empresa Eléctrica Quito S.A., modelados en DIgSILENT Power Factory, y considerando registros históricos de fallas en redes eléctricas del Distrito Metropolitano de Quito debido a incendios forestales.

Los resultados obtenidos demuestran que la evaluación e implementación de estrategias de mejora en redes de transmisión expuestas a incendios forestales incrementa la resiliencia del sistema eléctrico. Finalmente, esto permite concluir que la metodología desarrollada en este trabajo permite fortalecer la capacidad de respuesta del sistema ante incendios forestales, y contribuirá a la planificación y desarrollo de infraestructuras eléctricas más resilientes en el contexto ecuatoriano.

Palabras clave: Incendios forestales, Modelo de Optimización, Sistemas de Transmisión, Resiliencia de sistemas eléctricos.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES
TITLE: " EVALUATION OF THE RESILIENCE OF THE TRANSMISSION
SYSTEM OF ECUADOR IN THE FACE OF FOREST FIRES " .

TITLE: “EVALUATION OF THE RESILIENCE OF THE TRANSMISSION SYSTEM
IN THE FACE OF FOREST FIRES”

Authors:

Maldonado Quiñonez David Alejandro

Simbaña Iza Jeremy Sebastian

ABSTRACT

The increasing occurrence of natural meteorological hazards, such as wildfires, cyclones, and floods, poses a significant risk to the continuity of electricity supply. Although these events are relatively rare, their effects can be extremely severe, highlighting the importance of assessing and mitigating their impact. In this context, it is essential to incorporate the concept of resilience into the power system to understand its ability to withstand, recover, and adapt in the face of high-impact, low-probability disruptive events. This work focuses on evaluating and strengthening the resilience of Ecuador’s transmission power system against wildfires. To achieve this, a multi-stage methodological framework is proposed to characterize wildfires, assess their impact on the components of electrical networks, and analyze the system’s response. Additionally, strategies are identified to mitigate the impact of these events and enhance the resilience of the transmission system. This work uses a novel model to characterize wildfires, considering physical and environmental parameters, as well as a specialized resilience model to calculate the probability of failure in overhead line conductors due to wildfires. Furthermore, a direct current optimal power flow model (DC-OPF) with losses, implemented in AMPL, is incorporated to evaluate the system’s response. The resilience metrics used include the energy not supplied (ENS), EIU, and the FLEP metrics derived from the conceptual resilience trapezoid curve. The proposed methodology is applied to a real case study, using data from Empresa Eléctrica Quito S.A., modeled in DIGSILENT Power Factory,

and considering historical records of failures in electricity networks in the Metropolitan District of Quito due to wildfires.

The results demonstrate that the assessment and implementation of enhancement strategies in transmission networks exposed to wildfires increase the resilience of the power system. In conclusion, the methodology developed in this work strengthens the power system's ability to respond to wildfires and will contribute to the planning and development of more resilient electrical infrastructures in the Ecuadorian context.

Keywords: Forest Fires, Optimization model, Transmission systems, Resilience of electrical systems.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADAS
CARRERA: INGENIERIA EN ELECTRICIDAD

**Nombre de los estudiantes: Maldonado Quiñonez David Alejandro y Simbaña Iza
Jeremy Sebastián**

AVAL DE TRADUCCIÓN- Profesional Externo

Yadira Elizabeth Quiroz Chacán con cédula de identidad número: 0250278330 Licenciada en: Pedagogía del idioma inglés con número de registro de la SENESCYT:1010-2023-2634372; CERTIFICO haber revisado y aprobado la traducción al idioma Inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: **“EVALUACION DE LA RESILIENCIA DEL SISTEMA DE TRANSMISION DE ECUADOR ANTE INCENDIOS FORESTALES”** de: **Maldonado Quiñonez David Alejandro y Simbaña Iza Jeremy Sebastián**, egresados de la carrera de **Ingeniería en Electricidad**, perteneciente a la Facultad de: **CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADAS**.

En virtud de lo expuesto y para constancia de lo mismo se registra la firma respectiva.

Latacunga, 20 agosto 2024

.....
Quiroz Chacán Yadira Elizabeth
CI: 0250278330

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título: EVALUACIÓN DE LA RESILIENCIA DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE ECUADOR ANTE INCENDIOS FORESTALES

Fecha de inicio:

Abril 2024

Fecha de finalización:

Agosto 2024

Lugar de ejecución:

No aplica

Facultad que auspicia:

Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas

Carrera que auspicia:

Ingeniería en Electricidad

Proyecto Macro Asociado:

Desarrollo de sistemas eficientes para el abastecimiento y uso de energía eléctrica a nivel local, regional o nacional.

Equipo de trabajo:

Tutor: Wilian Guamán Cuenca M.Sc.

Cotutor: Dr. Alex Villamarín Jácome

Estudiantes: Maldonado Quiñonez David Alejandro

Simbaña Iza Jeremy Sebastián

Área de conocimiento:

07 ingeniería, Industria y Construcción / 071 Ingeniería y Profesiones Afines / 0713 Electricidad y Energía.

Línea de investigación:

Energías Alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.

Sublíneas de investigación de la carrera:

Planificación de sistemas eléctricos de potencia.

Grupos Temáticos:

1. Planificación y optimización de sistemas eléctricos de potencia.
2. Sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica.

2. INTRODUCCIÓN

Este capítulo establece las bases necesarias para evaluar la resiliencia del sistema eléctrico en Ecuador. En la Sección 2.1, se detallan los desafíos que enfrenta el sistema eléctrico ecuatoriano. al presentarse un evento natural no predecible de baja probabilidad, pero de alto impacto como los incendios forestales debido a que se puede presentar por distintos factores. A partir de datos obtenidos se logró determinar que la mayoría de los incidentes relacionados a incendios forestales en los años 2014,2015,2016 se presentaron con frecuencia en épocas de verano combinado con diferentes parámetros tanto físicos como ambientales. Estos desafíos presentan un gran riesgo para los sistemas de transmisión debido a que puede provocar un gran impacto y llevar a un colapso en el sistema afectando la confiabilidad del servicio eléctrico produciendo fallas y afectando a los elementos que forman parte de la red lo que implica evaluar el sistema y buscar formas para la mejora de la resiliencia.

En las Secciones 2.2 y 2.3, se definen el ámbito de acción y se argumenta la relevancia de estudiar la evaluación de la resiliencia en los sistemas eléctricos, con el objetivo de aplicarlo en el contexto ecuatoriano. A continuación, en la Sección 2.4, se identifican los beneficiarios tanto directos como indirectos de esta investigación. Finalmente, las Secciones 2.5 y 2.6 abordan la formulación del objetivo general y los objetivos específicos, junto con las hipótesis para evaluar la viabilidad del estudio, y se detalla el conjunto de tareas necesarias para llevar a cabo la investigación de manera eficiente.

2.1. PROBLEMA

2.1.1. Situación Problemática

Los eventos naturales impredecibles como los incendios forestales han afectado a los sistemas eléctricos de potencia (SEP), haciendo que sus componentes sean susceptibles a sufrir daños lo que compromete la capacidad de ofrecer un suministro adecuado de energía eléctrica. Los eventos naturales de baja probabilidad, pero de alto impacto (HILP) como los incendios forestales, al generarse pueden incluir no sólo un impacto instantáneo, sino múltiples e incluso continuos provocando el colapso de torres de transmisión, subestaciones y plantas generadoras, por lo que al fallar cualquiera de los elementos se genera una gran cantidad de condiciones anómalas para el sistema eléctrico [1]. Por ejemplo, diferentes fallas provocadas por incendios en zonas frecuentes suelen ocurrir entre el mediodía y las primeras horas de la noche,

coincidiendo con el horario dónde se presenta una demanda media y alta. Por lo tanto, al producirse la falla, se activan los disparos automáticos en los elementos que afectan al sistema llevándolo incluso a colapsar [2].

En Ecuador, los incendios forestales son una de las amenazas meteorológicas más recurrentes. Actualmente, se han convertido en un problema ambiental significativo, ya que en su mayoría son causados por factores naturales y humanos, siendo las actividades humanas la segunda causa principal de estos incendios.

Los datos estadísticos sobre la frecuencia de incendios forestales y las hectáreas quemadas se obtuvieron del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador para los años 2014, 2015 y 2016. En la referencia [3] los datos demuestran que durante la época de verano el porcentaje de incendios forestales aumenta, pero también depende de una combinación de diferentes parámetros como: temperatura, humedad, precipitación, dirección y velocidad del viento.

De acuerdo con datos proporcionados por la Empresa Eléctrica Quito (EEQ), encargada principalmente de operar la red de subtransmisión, distribución y subestaciones en Pichincha, se ha determinado que los incendios forestales han tenido un impacto significativo en la red de subtransmisión del Distrito Metropolitano de Quito. Los registros históricos entre 2001 y 2024 indican que estos incendios han provocado numerosas fallas en el sistema eléctrico, incluyendo la salida de líneas y la desconexión de disyuntores y seccionadores en diversas subestaciones. Los incendios, que fueron provocados, se propagaron con la ayuda de factores ambientales, causando fallas prolongadas en la infraestructura eléctrica.

En el contexto actual, uno de los principales desafíos que enfrentan los sistemas eléctricos es garantizar la entrega confiable de energía eléctrica durante la ocurrencia de eventos exógenos al sistema tales como desastres naturales o eventos climáticos extremos. Dado que las redes eléctricas atraviesan áreas forestales, tienen una alta exposición a sufrir daños debido a la ocurrencia de incendios, los sistemas eléctricos se vuelven altamente vulnerables a su impacto, lo que representa una seria amenaza para garantizar la continuidad de suministro, ya que no pueden ser capaces de responder ante la ocurrencia de este tipo de eventos y pueden durar periodos de tiempo largos sin suministrar energía para los consumidores finales mientras se logra controlar la emergencia, por lo que terminaría por salir fuera de servicio todo el sistema que se encuentra interconectado. Por lo tanto, se vuelve imprescindible llevar a cabo estudios

que permitan evaluar el impacto de los incendios forestales en los sistemas eléctricos y determinar las estrategias de mejora para mitigar sus efectos y de esta manera aumentar la resiliencia de estos sistemas.

2.1.2. Formulación del problema

Los incendios forestales, como amenazas naturales imprevisibles, plantean un desafío significativo para mitigar su impacto en los sistemas eléctricos. En este contexto, es crucial evaluar la resiliencia de los componentes de las redes eléctricas frente a este tipo de eventos.

2.2. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

El objeto de estudio es evaluar la resiliencia del sistema de transmisión de Ecuador ante incendios forestales.

2.3. JUSTIFICACIÓN

Este proyecto forma parte del proyecto formativo de la carrera de electricidad y coordinado por el grupo de investigación de sistemas eléctricos de potencia, además proporciona una comprensión detallada de cómo las amenazas naturales imprevisibles, como los incendios forestales, afectan a los componentes de los sistemas eléctricos de potencia. El impacto del calor en cualquiera de estos componentes puede tener repercusiones directas en la vida útil de los mismos, lo que a su vez afecta la integridad y la estabilidad del sistema eléctrico en su conjunto, potencialmente resultando en cortes de energía o apagones generalizados (conocidos como blackouts).

Por lo tanto, es crucial evaluar el impacto de los incendios forestales en los sistemas eléctricos e identificar estrategias efectivas que permitan mitigar los daños y facilitar la recuperación del sistema después de la ocurrencia de este tipo de eventos. Esto permitirá proporcionar un marco integral para abordar los efectos de los incendios forestales de manera más efectiva y de esta forma mejorar la resiliencia de los sistemas eléctricos.

En este trabajo, se propone desarrollar una metodología compuesta por varias etapas para caracterizar incendios forestales, evaluar su impacto en los componentes de las redes eléctricas, y analizar la respuesta del sistema. Además, se identifican estrategias para mitigar el impacto de estos eventos y fortalecer la resiliencia del sistema de transmisión. Esta metodología se basa en la caracterización de incendios forestales, considerando parámetros físicos y ambientales, así

como en la modelación de la probabilidad de falla en conductores de las líneas aéreas debido a incendios. Esto permitirá evaluar el impacto de los incendios forestales en los elementos que conforman la red eléctrica, así como determinar su vulnerabilidad ante este tipo de eventos. Además, se integra un modelo de optimización de flujo de potencia óptimo en corriente directa(OPF-DC) con pérdidas, para evaluar la respuesta del sistema.

El objetivo es identificar estrategias de mejora para mitigar el impacto de los incendios forestales, fortaleciendo la resiliencia del sistema eléctrico con el objetivo de garantizar la continuidad del suministro eléctrico. Estos esfuerzos contribuirán a mejorar la eficiencia operativa de los sistemas de transmisión de Ecuador, garantizando un suministro eléctrico confiable y estable para los usuarios finales.

2.4. BENEFICIARIOS

2.4.1. Beneficiarios Directos

Los beneficiarios directos son los postulantes.

2.4.2. Beneficiarios Indirectos

Los beneficiarios indirectos son estudiantes, profesionales de carreras afines, y actores públicos y privados del sector eléctrico.

2.5. OBJETIVOS

2.5.1. General

Evaluar el impacto de los incendios forestales en el sistema de transmisión identificando estrategias efectivas de mitigación para mejorar la resiliencia del sistema ante estos eventos adversos.

2.5.2. Específicos

- Realizar una revisión detallada de la literatura especializada para analizar la caracterización de los incendios forestales y su impacto en los sistemas eléctricos, abordando los tipos de daños provocados, los métodos de evaluación empleados, y las estrategias de mitigación desarrolladas.

- Desarrollar un marco metodológico que permita evaluar el impacto de los incendios forestales en los sistemas de transmisión utilizando un modelo de optimización lineal (LP).
- Aplicar el marco metodológico propuesto en un caso de estudio real para evaluar la efectividad de las estrategias de mitigación ante incendios forestales en el sistema de transmisión de energía eléctrica.

2.6. HIPÓTESIS Y SISTEMAS DE TAREAS

2.6.1. HIPÓTESIS

La resiliencia del sistema de transmisión de energía eléctrica en Ecuador puede mejorarse significativamente mediante la implementación de estrategias de mitigación específicas antes incendios forestales.

2.6.2. SISTEMA DE TAREAS

En la Tabla 2.1, se detalla el sistema de tareas realizadas para llevar a cabo este proyecto de investigación.

Tabla 2.1 Sistema de tareas.

Objetivos específicos	Actividad (tareas)	Resultados Esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Realizar una revisión detallada de la literatura especializada para analizar la caracterización de los incendios forestales y su impacto en los sistemas eléctricos, abordando los tipos de daños provocados, los métodos de evaluación empleados, y las estrategias de mitigación desarrolladas.	Revisión de trabajos relacionados con el problema de incendios forestales que afectan al sistema de transmisión. Analizar el impacto de los incendios forestales en sistemas eléctricos. Analizar los métodos de evaluación de probabilidad de falla en redes eléctricas debido a incendios forestales.	Obtención de trabajos relacionados con el tema propuesto Conocer la frecuencia y consecuencias de los incendios forestales en los sistemas eléctricos Metodología aplicable a este tipo de eventos	Bibliografía relacionada a la resiliencia en sistemas eléctricos ante eventos naturales. Artículos publicados de la IEEE, tesis de pregrado y posgrado.

<p>Desarrollar un marco metodológico que permita evaluar el impacto de los incendios forestales en los sistemas de transmisión utilizando un modelo de optimización lineal(LP).</p>	<p>Simulación de disponibilidad de líneas de transmisión</p> <p>Cálculo de parámetros que influyen en los incendios forestales.</p> <p>Elaboración de un modelo matemático para optimizar el flujo de potencia.</p>	<p>Diagrama de flujos que modele la metodología y el impacto de incendios forestales en la red eléctrica</p> <p>Probabilidad de falla de líneas de transmisión eléctrica.</p> <p>Modelo matemático para el modelo de optimización</p>	<p>Secretaría de gestión de riesgos.</p> <p>Aplicaciones con secuencias de etapa.</p> <p>Software AMPL</p>
<p>Aplicar el marco metodológico propuesto en un caso de estudio real para evaluar la efectividad de las estrategias de mitigación ante incendios forestales en el sistema de transmisión de energía eléctrica.</p>	<p>Modelado del sistema de transmisión del caso de estudio en DIgSILENT Power Factory.</p> <p>Construcción del caso de estudio con escenarios críticos del sistema.</p> <p>Formulación del análisis de los resultados del caso de estudio implementado</p>	<p>Respuesta del sistema eléctrico.</p> <p>Resultados obtenidos de métricas de resiliencia.</p> <p>Planes y Estrategias de mitigación</p>	<p>Software DIgSILENT Power Factory</p> <p>Métricas de resiliencia</p>

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

El presente capítulo aborda la base teórica de la resiliencia de los sistemas eléctricos ante la ocurrencia de incendios forestales. Se destaca la importancia de evaluar y fortalecer la capacidad de respuesta de la infraestructura eléctrica frente a estos eventos, considerando sus características físicas y ambientales, así como su impacto en la disponibilidad y seguridad del suministro eléctrico. Se incluyen varios temas empezando con la Sección 3.1 en la cual se describen los antecedentes relacionados a estudios especializados previamente sobre la temática acerca de la evaluación de la resiliencia en sistemas eléctricos, investigaciones orientadas a modelos de optimización, así como trabajos más recientes referentes al tema. Esto implica adoptar modelos que permitan simular la probabilidad y el impacto de un incendio en los elementos que conforman el sistema de transmisión ecuatoriano. En la Sección 3.2 se describe la resiliencia de los sistemas eléctricos, centrándose en los distintos eventos que pueden afectar a los elementos que componen la red eléctrica reduciendo su nivel operativo y deteriorando infraestructura mediante la evaluación de situaciones disruptivas, la implementación de mecanismos de respuesta y la aplicación de estrategias de recuperación. La Sección 3.3 se detalla el impacto que provocan los incendios forestales a los sistemas eléctricos, dónde se

presenta la afectación a los elementos que conforman el sistema eléctrico y a partir de esas características plantear curvas de fragilidad que permitan determinar la afectación que se presenta en cada uno de ellos. En la Sección 3.4 se presentan varios modelos que permitan simular la probabilidad y el impacto de un incendio forestal además de cómo el sistema eléctrico sería capaz de suministrar energía eléctrica mientras dura la emergencia.

3.1. ANTECEDENTES

El desencadenamiento de una serie de eventos naturales catastróficos de baja probabilidad y alto impacto (HILP, por sus siglas en inglés High Impact Low Probability) ha demostrado que los sistemas eléctricos de potencia son vulnerables a sufrir daños en sus componentes, comprometiendo su capacidad para suministrar energía eléctrica. Para evaluar el impacto de estos eventos, en la referencia [4] se ha reconocido que una metodología de varias etapas es esencial para modelar sus efectos en la operación e infraestructura eléctrica. Para esto en primera instancia, se caracteriza el evento. Luego, se evalúa la vulnerabilidad de los componentes y se modela la respuesta del sistema eléctrico utilizando modelos de optimización de flujos de potencia. Finalmente, se cuantifica la resiliencia, lo cual permite evaluar el desempeño operativo y de la infraestructura del sistema ante este tipo de eventos HILP.

En los últimos años, se han evaluado eventos HILP en los sistemas eléctricos, como terremotos, inundaciones y tifones, con el objetivo de mejorar la resiliencia en los sistemas eléctricos de potencia. Como menciona [5] se han desarrollado índices cuantitativos y metodologías que permiten evaluar dicha resiliencia, facilitando la comparación de opciones de recuperación y planes de restauración del sistema mediante optimización basada en el flujo de energía óptimo y varios métodos enfocados en la mitigación de interrupciones de carga y en la gestión de contingencias generales. Varios trabajos exploran distintas metodologías, proporcionando un análisis detallado y casos de estudio que respaldan su efectividad. En la referencia , se propone un modelo de fragilidad para componentes individuales y el sistema de transmisión completo, específicamente para evaluar el impacto en tiempo real de eventos climáticos severos, centrándose en vientos fuertes. La referencia [6] introduce un marco para estimar sistemáticamente la resiliencia considerando la intensidad del clima, ubicación de fallas, recursos de restauración y planes de respuesta a emergencias, utilizando un modelo de campo de viento de tifón y modelado de elementos finitos para desastres relacionados con tifones. Por su parte, la referencia [7] establece una base para cuantificar y modelar la resiliencia

de los sistemas eléctricos ante diversos desastres, incluyendo terremotos e inundaciones, mediante el modelado de desastres y la evaluación del estado de la línea de transmisión, utilizando curvas de fragilidad y simulaciones Monte Carlo. Además, la referencia [8] propone un marco de evaluación orientado a la planificación para diseñar sistemas de transmisión más resilientes a eventos climáticos extremos, como tifones, empleando un modelo probabilístico de tifones y fragilidad espacio-temporal. Finalmente, la referencia [9] destaca la necesidad de un enfoque estocástico para cuantificar el impacto de fenómenos meteorológicos severos, proponiendo un modelo secuencial de simulación de series temporales basado en Monte Carlo para evaluar la resiliencia del sistema eléctrico ante eventos climáticos adversos.

En los estudios de resiliencia de los sistemas eléctricos varios autores han reportado investigaciones enfocadas a incendios forestales. A continuación, la Tabla 3.1 presenta un resumen de los principales trabajos de investigación sobre la resiliencia de sistemas eléctricos ante incendios forestales.

Tabla 3.1 Aportes a investigación de resiliencia de sistemas de energía eléctrica ante incendios forestales.

Ref.	Título documento	Aporte	Modelo de evaluación del incendio	Modelo de evaluación de la red	Sector aplicado de la red	Estrategias de mejora	Red de estudio
[10]	An initial complex systems analysis of the risks of blackouts in power transmission systems	Analiza los riesgos de apagones en sistemas de transmisión de energía en el contexto de incendios forestales. Utiliza el modelo OPA para capturar la dinámica global de los apagones y evaluar estrategias de mitigación.	Modelo probabilístico	Modelo probabilístico	Transmisión	Mitigación de apagones mediante consideración de sobrecargas en las líneas de transmisión que se cortan con cierta probabilidad.	Red sintética de 190 barras
[11]	Vulnerability assessment of the power grid against progressing wildfires	Evalúa el impacto de los incendios forestales en las líneas de transmisión eléctrica mediante un modelo de equilibrio térmico que considera la transferencia de calor radiativa y convectiva.	Modelo teórico	Optimización	Transmisión	-Ajuste del flujo de energía -Incorporación de clasificaciones de línea modificadas en algoritmos OPF -Evaluación y ajuste de clasificaciones térmicas en tiempo real.	Red sintética de 30 barras
[12]	Evaluating the resilience of electrical power line outages caused by wildfires	Este estudio considera un modelo de crecimiento del fuego en paisajes heterogéneos en cuanto a topografía, elementos meteorológicos y variables de combustible. Se resuelve un problema de flujo de energía óptimo que incorpora el proceso de enfriamiento y calentamiento de los conductores de energía.	Modelo teórico	Optimización	Transmisión	-Clasificación térmica dinámica para ajustar en tiempo real la capacidad de transmisión y reducir sobrecalentamientos. -Monitoreo y control en comportamiento del fuego, permitiendo una respuesta más rápida y eficiente ante incendios forestales.	Red sintética de 30 barras
[13]	Robust optimization for wildfire response analysis in highly renewable power systems	Presenta un escenario dado de propagación del incendio para identificar las peores contingencias inducidas por el incendio y perfiles asociados, un modelo aplicado en la selección de una topología para un caso que presente mejoras en el funcionamiento de la situación base del sistema.	Modelo matemático	Optimización	Generación Transmisión	Evaluación de escenarios de incendios forestales para seleccionar una configuración topológica de la red eléctrica que pueda reducir los riesgos de una demanda de energía insatisfecha frente a incendios.	Red real de 65 barras
[14]	Optimal distribution system operation for enhancing resilience against wildfires	Proponen un método basado en programación estocástica, con el objetivo de mejorar la resiliencia de los sistemas de distribución y así minimizar la desconexión de carga considerando el impacto del incendio forestal en la temperatura del conductor y la funcionalidad de la línea.	Modelo estocástico	Optimización	Distribución		Red sintética 33 barras

3.2. RESILIENCIA DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS

Los sistemas eléctricos son las infraestructuras más extensas dentro de las redes energéticas, lo que los hace susceptibles a diversas contingencias y perturbaciones que pueden interrumpir la provisión de energía. La investigación y gestión se han enfocado en la seguridad y confiabilidad de estos sistemas, considerando posibles fallos o indisponibilidades de sus elementos. Para fortalecer la resiliencia, se aborda el análisis y evaluación de eventos poco probables, pero con potenciales impactos significativos en estos sistemas.

El término "resiliencia" ha sido interpretado de diversas maneras para adaptarlo a un concepto claro y de entendimiento común en el contexto de los sistemas eléctricos. Varios autores, como se menciona en [15], [16] y [17], han trabajado en definir y estandarizar este término, proporcionando marcos teóricos y prácticos que facilitan su aplicación en el análisis y mejora de la resiliencia de las redes eléctricas.

En el ámbito de la ingeniería, el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) ha destacado la importancia de la resiliencia en las redes eléctricas, especialmente después de los desastres naturales que se han presentado en el país, por tanto en [15] la resiliencia se refiere a la capacidad de un sistema eléctrico para anticiparse y ajustarse a condiciones variables, permitiéndole soportar y recuperarse con rapidez ante perturbaciones, contingencias o interrupciones que puedan ocurrir en el sistema.

En la Figura 3.1, se ilustra la curva conceptual del trapecioide de resiliencia que representa el comportamiento de un sistema eléctrico y cual es la evolución de respuesta luego de ocurrir un evento adverso. La resiliencia presenta características iniciales antes de la perturbación denotado como R_0 y después de la perturbación el nivel de resiliencia no será igual en todos los casos. R_{pd} representa el punto mínimo que cae la resiliencia al alcanzar la perturbación. [16].

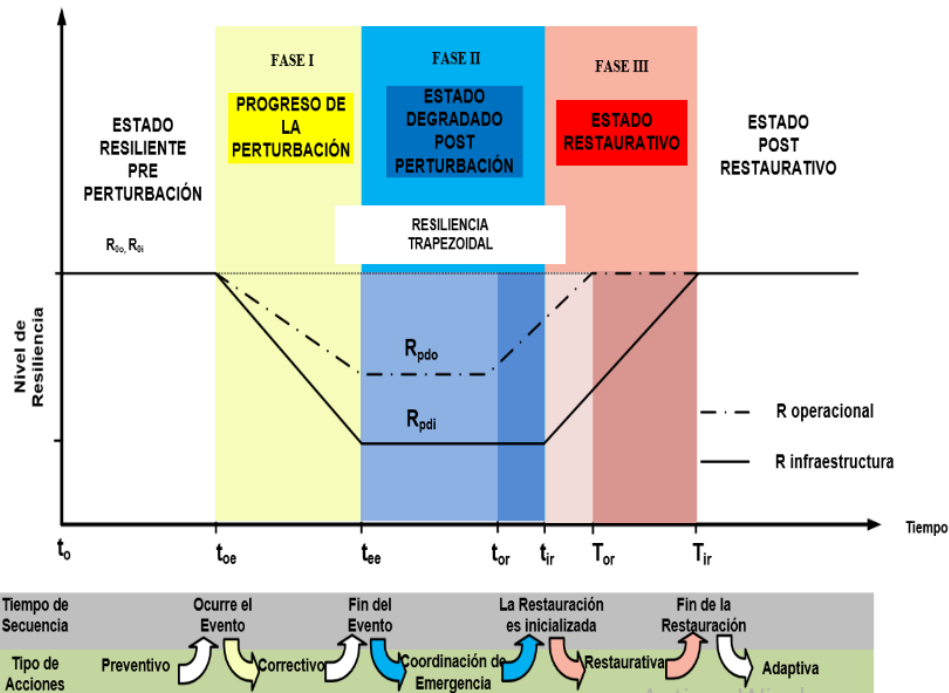


Figura 3.1 Comportamiento de resiliencia de un sistema eléctrico, curva trapezoidal asociada a evento perturbador. Tomado de [16].

Dentro de la curva conceptual del trapecio de resiliencia se presentan 3 fases:

Fase I: tanto para la resiliencia operativa como para la resiliencia de la infraestructura, el nivel de resiliencia disminuye desde el nivel previo a la interrupción hasta el nivel de resiliencia posterior al evento. Es importante considerar que R_{pdo} puede ser mayor o menor que R_{pdi} , dependiendo de la severidad del sistema y del evento que afecte al sistema eléctrico.

Fase II: durante esta fase, el sistema permanece en un estado posterior a la interrupción con una resiliencia operativa y de infraestructura reducida durante algún tiempo hasta que la restauración operativa y de infraestructura comienza en los tiempos t_{or} , t_{ir} , de manera correspondiente.

Fase III: El estado de recuperación, que corresponde al estado de recuperación del sistema, se puede dividir en dos subfases: recuperación operativa ($t \in [t_{or}, T_{or}]$), y la recuperación de infraestructura ($t \in [t_{ir}, T_{ir}]$) [16].

3.2.1. Resiliencia operacional

La resiliencia operacional se refiere a las propiedades que aseguran la estabilidad del funcionamiento de un sistema eléctrico. El enfoque realizado a resiliencia operacional constituye la parte de energía eléctrica proveniente del sistema medida en (MW) en función del

tiempo [16]. Se analiza cómo varía la disponibilidad de energía eléctrica en relación con diferentes condiciones y desafíos operativos, con el fin de fortalecer la capacidad del sistema para responder eficazmente a demandas cambiantes. Se busca mejorar la capacidad de garantizar un suministro eléctrico ininterrumpido a los usuarios y la capacidad de respuesta del parque de generación ante la presencia de desastres.

3.2.2. Resiliencia de infraestructura

La resiliencia de la infraestructura se refiere a la capacidad física para resistir y mitigar las averías, daños o colapsos que pueden afectar su funcionamiento. Esta resistencia física se refleja en los componentes del equipamiento físico del sistema eléctrico [16]. A partir de la revisión de la literatura, varios estudios abordan aspectos clave para evaluar la resiliencia. Estos incluyen la estimación del estado de la infraestructura, el desarrollo de diferentes modelos de regresión de fallas para determinar el estado de los equipos de la red y una técnica muy utilizada que es la determinación de curvas de fragilidad aplicables a la infraestructura para identificar los elementos más sensibles a posibles eventos adversos.

3.2.3. Métricas de Resiliencia

Para medir la resiliencia de un sistema eléctrico, es crucial establecer un conjunto de fórmulas matemáticas que faciliten la evaluación de su desempeño y eficacia en las diversas etapas de la curva de resiliencia trapezoidal. Según [15], se describe el desarrollo de métricas y técnicas para analizar la resiliencia en los sistemas eléctricos. La Tabla 3.2 a continuación muestra una serie de métricas sugeridas en [16] para medir la resiliencia del sistema eléctrico. Estas métricas evalúan la velocidad con la que la resiliencia disminuye tras un evento (Fast), el nivel mínimo al que llega (Low), la extensión del deterioro después del evento (Extensive), y la rapidez con la que la red se recupera (Promptly). Los datos que se emplean fueron obtenidos de la Figura 3.1.

Tabla 3.2 Métricas de resiliencia para un sistema eléctrico [18].

Métrica	Expresiones Matemáticas		Unidades de Medida	
	Operacional	Infraestructura	Operacional	Infraestructura
F	$\frac{R_{pdo} - R_{0o}}{t_{ee} - t_{oe}}$	$\frac{R_{pdi} - R_{oi}}{t_{ee} - t_{oe}}$	MW/horas	Número de líneas tripped/horas
L	$R_{0o} - R_{pdo}$	$R_{oi} - R_{pdi}$	MW	Número de líneas tripped
E	$t_{or} - t_{ee}$	$t_{ir} - t_{ee}$	Horas	Horas
P	$\frac{R_{0o} - R_{pdo}}{T_{or} - t_r}$	$\frac{R_{oi} - R_{pdi}}{T_{ir} - t_r}$	MW/horas	Número de líneas restauradas/horas

* tripped: Disparo de apertura del interruptor.

Dos métricas comúnmente utilizadas en estudios de confiabilidad y empleadas para estudios de resiliencia son el valor esperado de la ENS que se presenta en eventos de contingencia y el índice de confiabilidad energética EIU (Índice de falta Confiabilidad Energética). El primer valor mostrado en la ecuación 3.1 indica la cantidad de electricidad (energía) no proporcionada durante el período de estudio en (MWh o GWh). La segunda ecuación, presentada en la Ecuación 3.2, está directamente relacionada con la EENS y está normalizada con base en la demanda total de energía (%) dentro del período de estudio.

$$ENS = \sum_{s \in SC} ENS_s * P_s \quad (3.1)$$

$$EIU = \frac{ENS}{E} * 100\% \quad (3.2)$$

Dónde:

ENS_s : Se refiere a la energía no proporcionada, con una probabilidad P_s de que ocurra el escenario P_s durante el período de tiempo analizado. E representa la demanda de energía a lo largo de todo el período de estudio.

3.3. INCENDIOS FORESTALES

Los incendios forestales, ocurren en bosques naturales o plantados, originados tanto por la acción del ser humano como por causas naturales. Estos incendios avanzan sin control, ocasionando significativos daños ecológicos, climáticos, económicos y sociales. Un incendio forestal puede surgir en áreas boscosas o de pastizales debido a causas naturales o provocadas por actividades humanas, y su evolución se ve influenciada por factores como la topografía, las condiciones climáticas y los tipos de material combustible, entre otros aspectos.

3.3.1. Causas de los incendios forestales

Las causas de los incendios forestales suelen clasificarse en naturales o humanas, y dentro de las de origen humano, se incluyen aquellas provocadas de manera intencional, los accidentes y las negligencias. La mayoría de los incendios de acuerdo con datos históricos tienen mayor incidencia al ser provocados, en cambio en menor incidencia por causas desconocidas [19]

Las causas principales de los incendios forestales se detallan a continuación en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Causas principales de los incendios forestales.

Tipo	Causas
Accidentales	Cortes en las líneas eléctricas, colisiones automovilísticas, ferroviarias y aéreas.
Negligencias	Incendios agrícolas no supervisados, fogatas de campistas, fumadores, quema de desechos, limpieza de caminos en carreteras y empleo del fuego en otras actividades productivas dentro de zonas boscosas.
Intencionales	Incendios provocados por disputas entre personas o comunidades, tala ilegal o conflictos legales.
Naturales	Descargas de rayos o actividad volcánica.

3.3.2. Efectos de los incendios forestales

Los incendios forestales tienen consecuencias significativas en la superficie del suelo, que varían según la intensidad del calentamiento. Durante un fuego intenso, las temperaturas dentro de la masa en ignición pueden alcanzar niveles extremadamente altos. En la superficie del suelo, las temperaturas dependen del tipo de vegetación: son muy elevadas en bosques de coníferas, moderadas en matorrales y más bajas en pastizales.

Estos incendios no sólo aumentan las temperaturas, sino que también tienen efectos en los procesos ecológicos debido a la diversidad de estructuras del paisaje y las diversas zonas de alta vegetación. La intensidad, recurrencia y duración del incendio forestal determinan la magnitud de estos efectos. Los impactos directos incluyen la pérdida de fauna, la destrucción de la vegetación, pérdida en infraestructura y la degradación del suelo.

La Tabla 3.4 presenta los efectos provocados por incendios forestales en países con un alto impacto de estos eventos. Presenta las condiciones en las que ocurren estos incendios, las causas naturales que los desencadenan, y los efectos resultantes tanto en el medio ambiente como en la sociedad. Esta información es crucial para entender las dinámicas de los incendios forestales y desarrollar estrategias efectivas de prevención.

Tabla 3.4 Efectos de incendios forestales en países con alto impacto de estos eventos.

Ref.	Efecto del incendio	País afectado	Tipo de zona	Causas de inicio del incendio					Consecuencia del incendio	Estación del año
				Condiciones climáticas		Causas naturales				
				Cambio de estación	Alta temperatura	Negligencia	Vegetación seca	Deforestación		
[20]	Ambiental	Chile	Boscosa	✓		✓			-Incendios en varias zonas de la región -Superficies afectadas superiores a 20 mil hectáreas.	Verano
[21]	Socioeconómico	Bolivia	Seca	✓				✓	-Pérdida de cobertura forestal, regulación climática y provisión de agua. -Pérdida de suelo fértil, aumento de erosión, emisiones de dióxido de carbono y desertificación. -Déficit de materia prima.	Verano
[22]	Socioeconómico	Paraguay	Boscosa		✓	✓			-Pérdida en maquinaria e infraestructura. -Afectación a las estructuras de propiedad privada.	Verano

3.3.3. Parámetros de incendios forestales

En el desarrollo de un incendio forestal, factores clave como la topografía del terreno, las características del combustible y los fenómenos atmosféricos juegan un papel fundamental. Estos elementos contribuyen significativamente a la propagación y duración del incendio, lo que resulta en una afectación más extensa del área circundante.

La topografía del terreno, incluyendo la pendiente y la orientación, puede influir en la velocidad y dirección de la propagación del fuego. Pendientes pronunciadas pueden acelerar el avance del incendio, mientras que la orientación del terreno respecto al sol puede afectar la humedad y combustibilidad de la vegetación.

Las características del combustible, como su cantidad, tipo y distribución, determinan la intensidad y persistencia del fuego. La presencia de material combustible abundante y seco aumenta la probabilidad de una propagación rápida y sostenida del incendio a través del bosque.

Los fenómenos atmosféricos, como la velocidad y dirección del viento, la temperatura y la humedad relativa, también desempeñan un papel crucial en la evolución del incendio. El viento puede transportar chispas y llamas, facilitando la propagación del fuego a áreas más distantes, mientras que las condiciones de alta temperatura y baja humedad pueden aumentar la inflamabilidad del entorno forestal [23],[24].

En conjunto, estos factores como se puede apreciar en la Figura 3.2 interactúan de manera compleja para influir en la magnitud y alcance de un incendio forestal, prolongando su duración y afectando a una mayor área dónde se produce.


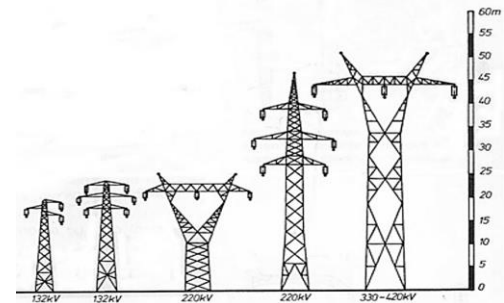
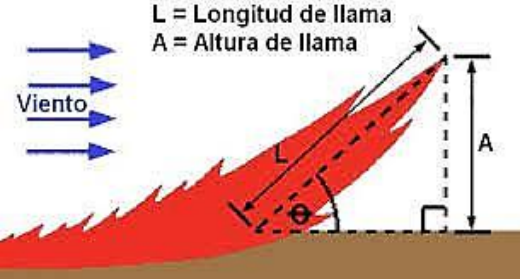


Figura 3.2 Parámetros determinantes para evolución de incendios. Tomado de [25].

Debido al aumento de la ocurrencia de eventos naturales las condiciones climáticas tienden a afectar de forma negativa las estructuras de los sistemas eléctricos. La frecuencia de los desastres naturales está en aumento, y el cambio climático tiene el potencial de afectar negativamente los sistemas eléctricos de diversas maneras. En los últimos años, la incidencia de incendios forestales ha aumentado debido a cambios en factores ambientales y físicos, acelerando la necesidad de investigar y adaptar la operación de los sistemas de transmisión a condiciones distintas a las tradicionales.

Debido a las consecuencias negativas que los incendios forestales tienen sobre la infraestructura y la operación de los sistemas eléctricos, es fundamental determinar cómo diferentes características influyen en su comportamiento para entender la probabilidad y severidad de estos eventos. A continuación, la Tabla 3.5 presenta los principales parámetros físicos y ambientales que afectan el modelamiento y generan diferentes escenarios de riesgo que pueden incrementar la probabilidad de falla debido a incendios forestales de acuerdo con [26]. Comprender estas interacciones es esencial para desarrollar estrategias de mitigación eficaces que protejan la infraestructura eléctrica y minimicen el impacto de los incendios.

Tabla 3.5 Parámetros físicos y ambientales para modelar un incendio forestal

	Parámetro	Concepto	Figura
PARÁMETROS FÍSICOS	Pendiente del paisaje [S] en grados	La inclinación del terreno afecta la velocidad de propagación del fuego. Incendios en pendientes pronunciadas tienden a moverse más rápidamente cuesta arriba debido al efecto de precalentamiento de la vegetación pendiente arriba.	
	Altura del conductor [h] en metros [m]	En el contexto de redes eléctricas, la altura a la que se encuentran los conductores puede influir en el riesgo de que el fuego los alcance y dañe la infraestructura eléctrica.	
	Longitud de la llama [Lf] en metros [m]	La longitud de la llama es un indicador de la intensidad del fuego. Llamas más largas suelen estar asociadas con incendios más intensos y peligrosos, que pueden causar mayores daños a la infraestructura eléctrica.	

PARÁMETROS AMBIENTALES	<p>Índice de aridez del combustible [M_s] en porcentaje [%]</p>	<p>Mide la sequedad del material combustible. Combustibles más secos son más susceptibles a encenderse y propagar incendios de manera más intensa.</p>	
	<p>Profundidad del combustible [FD] en [cm]</p>	<p>La cantidad de material vegetal disponible como combustible. Mayor profundidad implica mayor cantidad de material que puede arder, incrementando la intensidad del incendio.</p>	
	<p>Velocidad del viento [V_w] en [km/h]</p>	<p>Vientos fuertes pueden avivar las llamas y aumentar la velocidad de propagación del fuego, además de dispersar brasas que pueden iniciar nuevos focos de incendio.</p>	

3.4. INCENDIOS FORESTALES EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS

La consideración del impacto potencial de eventos naturales poco frecuentes, pero de gran magnitud, como los incendios forestales, en el sistema de transmisión de energía es de suma importancia. Por consiguiente, resulta imperativo analizar los factores que influyen en la generación de incendios y comprender sus posibles efectos en los componentes SEP.

La infraestructura de transmisión eléctrica, en particular, se encuentra expuesta a la amenaza que representan los incendios forestales [27]. Es común que las líneas de transmisión se ubiquen

cerca de áreas propensas a incendios, y estos pueden tener diversas repercusiones en una línea de transmisión. Incendios de gran magnitud pueden dañar torres y postes de transmisión, especialmente aquellos construidos con madera, llegando incluso a provocar el colapso completo de la línea.

Según [28] y [29], las partículas de humo y hollín del incendio pueden disminuir la rigidez dieléctrica de las cadenas de aislamiento que aíslan los conductores de la estructura de la torre, así como la del aire, que es el medio aislante entre los conductores. Esto podría provocar una rotura del aislamiento y descargas eléctricas entre los conductores o entre los conductores y la estructura de la torre. Además, el aumento significativo de temperatura en los conductores ubicados cerca del incendio puede provocar una flexión excesiva del conductor, una peligrosa disminución de la distancia de seguridad de la línea, y una pérdida irreversible de resistencia a la tracción en el conductor.

Como se presenta en la Figura 3.3 al consumirse el incendio en las zonas afectadas el humo es uno de los elementos que afectan a las líneas de transmisión y al seguir propagándose el fuego también se ven afectadas las infraestructuras que se encuentran en la subestación.



Figura 3.3 Humo afectando a las líneas e infraestructura de subestación [21].

Las deficiencias en el sistema de distribución de energía, así como las deficiencias en la infraestructura asociada, especialmente en momentos de alto riesgo de incendio, pueden desencadenar la propagación de incendios forestales. Hay diversos problemas que pueden originar fallos en el sistema de distribución de energía, clasificables en causas relacionadas con

la vegetación, equipos eléctricos, infraestructura de soporte como postes y crucetas, y fallos en las líneas de transmisión eléctrica.

Las fallas relacionadas con la vegetación suelen ocurrir cuando un conductor eléctrico se rompe y entra en contacto con el suelo, o cuando se inclina y toca las ramas de árboles de gran tamaño [30]. Adicionalmente, la caída de árboles o ramas sobre los conductores puede generar fallos, conocidos como fallas de alta impedancia (HIF). Por otro lado, la falla de equipos eléctricos abarca problemas en elementos de la red como las líneas aéreas, interruptores, disyuntores y capacitores.

Como se puede observar en la Figura 3.4, al provocarse un incendio por caída de árboles y zonas de vegetación las llamas empiezan a crecer y terminan afectando a los equipos e infraestructura que se encuentran en el entorno.



Figura 3.4 Incendio forestal afectando a línea y elementos de distribución [21].

Al producirse un incendio forestal, el impacto en cada elemento de la red eléctrica es crucial para determinar su resiliencia. La Tabla 3.6 destaca la necesidad de implementar estrategias de resiliencia en los sistemas eléctricos para enfrentar estos incendios, evidenciando que las emergencias varían en duración y afectan múltiples sectores del sistema. Los daños significativos en la infraestructura resaltan la importancia de fortalecer y proteger la red eléctrica, así como de implementar planes de respuesta y recuperación eficientes.

Tabla 3.6 Impacto histórico de incendios forestales en diversos sectores de sistemas eléctricos.

Ref .	País	Duración de emergencia	Sector afectado			Año de incidente	Descripción del impacto en la red
			Generación	Transmisión	Distribución		
[31]	Argentina	60 a 240 minutos	✓	✓		2023	Desconexión de 3 líneas de alta tensión. Apagón de centrales de generación.
[32]	Perú	No definido	✓	✓		2022	Daño en las líneas de alta tensión.
[33]	Panamá	90 a 180 minutos		✓		2019	Se presentaron fluctuaciones que afectaron a las torres de transmisión y cadena de aisladores lo que provocó apagones.
[34]	Ecuador	30 a 120 minutos		✓		2013	Líneas de transmisión de alta tensión quemadas.
[35]	California	220 – 720 minutos		✓	✓	2018	Desconexión de líneas de transmisión y distribución, cortes de energía masivos, daños a la infraestructura .
[35]	Australia	100 – 480 minutos	✓	✓		2020	Afectación a líneas de transmisión y algunas plantas de generación, resultó en apagones y daños a la infraestructura .

3.5. MODELOS DE INCENDIOS FORESTALES

La predicción del comportamiento de los incendios forestales constituye un desafío complejo. Múltiples variables interactúan para determinar la intensidad del fuego, su propagación por el terreno y sus consecuencias en el entorno circundante. Por tanto, resulta imperativo desarrollar modelos que permitan comprender y prever adecuadamente estos fenómenos.

El estudio del comportamiento de los incendios forestales involucra la consideración de diversos parámetros y aspectos para la modelización matemática. Estos incluyen:

- a) la dinámica de propagación de los incendios forestales, que abarca el avance del perímetro del fuego, la velocidad de propagación, la intensidad de la línea de fuego y el consumo de combustible.
- b) las características del frente de los incendios forestales, que comprenden aspectos geométricos de la llama como su altura, longitud, profundidad y ángulo de inclinación.
- c) el impacto de los incendios forestales, que evalúa los efectos de estos eventos (tales como calor y emisiones) en las infraestructuras.

Se ha llevado a cabo una amplia investigación en el área de modelización del comportamiento de los incendios forestales, clasificándose los modelos en tres categorías principales (1) modelos teóricos, que se fundamentan en los principios de mecánica de fluidos, combustión y transferencia de calor; (2) modelos empíricos, que se sustentan en correlaciones estadísticas entre las variables influyentes; y (3) modelos semiempíricos, que combinan ecuaciones teóricas básicas con resultados de experimentación [36].

En la Tabla 3.7 se presenta una clasificación genérica que permite clasificar diversos tipos de modelos de incendios forestales, Estos incluyen modelos de propagación de incendios en superficie, modelos de iniciación y propagación y los más significativos modelos apreciados por distintas investigaciones.

Tabla 3.7 Modelos de incendios forestales

Ref.	Tipo Modelo	Descripción modelo	Parámetros que intervienen en incendio forestal														
			Parámetros ambientales							Parámetros físicos							
			Radiación	Combustible	Humedad	Tasa de Propagación	Tasa diferencial	Dirección, velocidad del viento	Temperatura	Índice de aridez	Angulo de inclinación	Altura del conductor	Longitud de la llama	Paisaje	Área quemada	Inclinación de la llama	
[37]	Modelo de propagación	Calcula incendios forestales a partir de propagación por radiación de la llama.	✓	✓	✓	✓							✓				✓
[38]	Modelo propagación por superficie	Calcula zona de combustión, emisión de llama potencia y potencia convectiva.		✓		✓	✓										
[39]	Modelo de propagación	Analiza el comportamiento de propagación del fuego en la superficie.	✓	✓					✓						✓		
[40]	Modelo propagación por superficie	Calcula el calor radiactivo producido por fuego de superficie.	✓	✓		✓			✓						✓		
[41]	Modelo de propagación	Predice la tasa de propagación del incendio forestal y la intensidad de la línea de fuego en un estrato continuo de combustible.		✓		✓		✓							✓		
[41]	Modelo propagación por superficie	Predice el comportamiento de los incendios superficiales a				✓									✓	✓	

		gran escala EMBYR.														
[42]	Modelo de iniciación	Calcula con precisión la transferencia de calor radiactivo.	✓			✓		✓	✓			✓	✓			
[26]	Función de fragilidad	Utiliza funciones parametrizadas de fragilidad y toman en cuenta diversas condiciones físicas y ambientales que afectan la ocurrencia de incendios forestales.		✓		✓		✓			✓	✓	✓	✓		

3.6. ESTRATEGIAS PARA MITIGAR INCENDIOS FORESTALES EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

La mitigación de un incendio forestal se refiere a la toma de medidas para reducir su intensidad, propagación y efectos negativos en el entorno natural y las comunidades cercanas. Esto incluye una serie de acciones preventivas y de control que se llevan a cabo durante y después del incendio [30].

Durante una emergencia, como se ha observado en diversas investigaciones, es crucial identificar estrategias efectivas para asegurar la confiabilidad del suministro eléctrico. Es imperativo determinar las decisiones óptimas y adecuadas para garantizar el mantenimiento de este servicio mientras se atiende la emergencia. Las técnicas de mitigación de incendios forestales se clasifican en categorías según su papel en la mitigación de estos eventos en los sistemas de energía:

- Métodos de prevención de fallas como endurecimiento estructural, gestión e inspección de activos, protección avanzada de los sistemas y el manejo de la vegetación, estos métodos se utilizan para reducir la probabilidad de que se produzcan averías o fallos en los sistemas.
- Métodos de prevención e ignición como la protección sensible, reconectores y conexión a tierra resonante con la finalidad de reducir la probabilidad de ignición de incendios forestales en caso de que ocurra una falla.

· Esfuerzo de respuesta a incendios y mitigación de impactos como mantener la coincidencia situacional y establecer la comunicación con socios de infraestructura, equipos de bomberos y clientes, estos métodos se realizan en caso de que ya se produzca un incendio forestal.

La Tabla 3.8 presenta un resumen de las estrategias de mitigación implementadas para prevenir y responder a incendios forestales en sistemas eléctricos. Cada estrategia se evalúa en función de tres categorías clave: prevención de fallas, suspensión de arco y prevención de ignición, respuesta a incendios y mitigación de impacto. A continuación, se describen brevemente cada una de estas estrategias .

Tabla 3.8 Estrategias de mitigación para incendios forestales en sistemas eléctricos

Estrategias de mitigación	Descripción	Prevención de falla	Suspensión de arco y prevención de ignición	Respuesta a incendios y mitigación de impacto
Línea soterrada	Instalación de líneas eléctricas bajo tierra para reducir la exposición a elementos que pueden causar incendios.	✓	✓	
Endurecimiento estructural	Mejora de la infraestructura eléctrica mediante el uso de materiales más resistentes y diseños que soporten mejores condiciones extremas.	✓		
Inspecciones de activos	Realización de inspecciones periódicas y detalladas de los componentes del sistema eléctrico para identificar y corregir posibles fallas antes de que se conviertan en problemas serios.	✓		
Análisis de forma de onda	Utilización de técnicas de análisis de formas de onda para detectar anomalías en el sistema eléctrico que podrían indicar fallas o condiciones peligrosas.	✓	✓	
Gestión de vegetación	Control y mantenimiento de la vegetación alrededor de las líneas eléctricas para prevenir que el crecimiento excesivo cause incendios.	✓	✓	
Protección sensible	Implementación de sistemas de protección que responden rápidamente a condiciones anormales, minimizando la posibilidad de incendios.		✓	

Reconectores	Uso de dispositivos que permiten restaurar el servicio eléctrico rápidamente después de una interrupción, reduciendo la duración de las condiciones peligrosas.		✓	
Operación proactiva	Estrategias operacionales que anticipan y mitigan riesgos antes de que ocurran, basadas en datos y análisis predictivos.		✓	
Vigilancia de incendios	Monitoreo continuo de áreas propensas a incendios mediante tecnología avanzada para detectar incendios rápidamente y permitir una respuesta inmediata.			✓
Planificación de emergencias	Desarrollo y mantenimiento de planes detallados de respuesta a emergencias para coordinar acciones rápidas y efectivas en caso de incendios.			✓

4. METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la metodología utilizada para llevar a cabo este proyecto de titulación. En este capítulo se presenta la metodología utilizada para llevar a cabo este proyecto de titulación. En la Sección 4.1 se proporciona una explicación detallada sobre la organización y gestión de las etapas que contiene la metodología para alcanzar los objetivos del proyecto, resaltando las actividades clave y esenciales. La Sección 4.2 representa la primera etapa de la metodología que se centra en la caracterización del sistema eléctrico y el evento adverso, un proceso que se basa en la recopilación y análisis de datos técnicos de los elementos de la red para modelarlo. Se incluye la identificación de la zona de estudio para determinar las características específicas del área donde ocurre el evento. La sección 4.3 presenta la etapa de evaluación, donde se detalla cómo obtener o realizar el cálculo de cada uno de los parámetros necesarios que abarca esta metodología. Esta sección incluye también el cálculo de la probabilidad de falla de las líneas de transmisión que se ven afectadas y al realizar la evaluación del sistema eléctrico con la ayuda de un modelo de optimización se determina la respuesta del sistema eléctrico ya que entrega resultados de una métrica fundamental en la investigación. La sección 4.4 aborda los planes y estrategias de mitigación que permiten mejorar la respuesta del sistema eléctrico a partir de los resultados obtenidos de las métricas de resiliencia. Finalmente, la sección 4.5 presenta el caso de estudio con los diferentes escenarios donde se realiza el análisis del sistema eléctrico al desconectar las líneas de transmisión con probabilidad de falla más altas, se emplea la metodología para evaluar la respuesta de la red de prueba y determinar los resultados de la investigación.

4.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA METODOLOGÍA

El objetivo de este proyecto es evaluar la resiliencia del sistema eléctrico en el sistema de transmisión frente a incendios forestales. Para esto, se propone a metodología, ilustrada en la Figura 4.1, que está compuesta por tres etapas clave. La primera etapa implica la caracterización del sistema eléctrico y los incendios forestales, proporcionando los datos iniciales necesarios para el caso de estudio. En la segunda etapa, se sigue una secuencia de pasos que guían el proceso de evaluación. Primero, se identifican los parámetros físicos y naturales que influyen en la ocurrencia de incendios forestales. A partir de estos parámetros, se calcula la probabilidad de falla de conductores aéreos, un indicador clave para determinar la vulnerabilidad del sistema

eléctrico. Continuando con la evaluación, se simulan las posibles fallas del sistema eléctrico utilizando los resultados previamente calculados y un valor referente establecido. Este enfoque permite determinar si un componente falla durante un evento adverso. El apartado final de la etapa de evaluación consiste en simular el sistema eléctrico utilizando un modelo de optimización de flujos de potencia que permite determinar la respuesta del sistema ante fallas en puntos específicos de la red y evaluar su comportamiento frente a eventos adversos. La etapa final de esta metodología permite identificar estrategias mejora para mitigar los efectos de los incendios forestales en los componentes del sistema de transmisión.

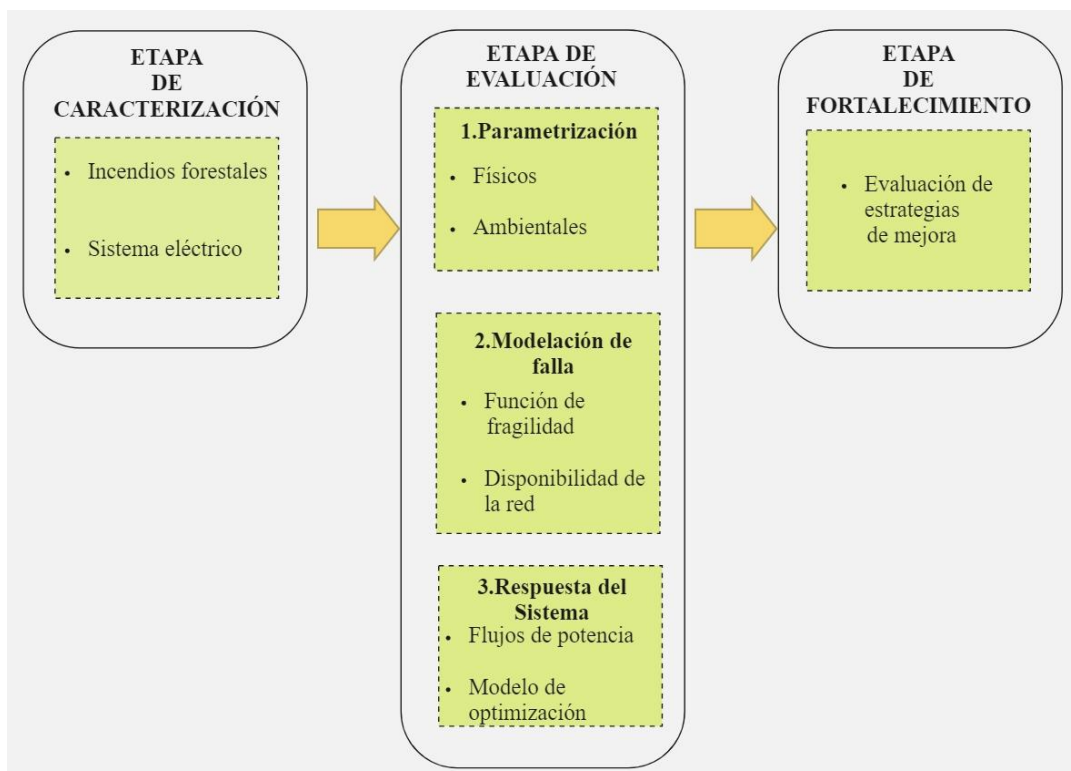


Figura 4.1 Metodología del proyecto.

4.2. ETAPA DE CARACTERIZACIÓN

4.2.1. Caracterización del sistema eléctrico

Para evaluar un sistema eléctrico, es fundamental contar con una base de datos que permita crear un modelo de la red eléctrica mediante un software avanzado de simulación de flujos de potencia. Esto requiere datos detallados de cada uno de los elementos que componen el sistema eléctrico de potencia, como se detalla a continuación en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Datos requeridos para modelar la red eléctrica en un software de sistemas de potencia.

Elemento	Parámetros	Unidades
Generadores	Límites de potencia activa (Max y Min)	MW
	Curva de capacidad	-
	Tipo de tecnología y factor de disponibilidad	%
	Costos de generación	USD/MWh
Transformadores	Potencia nominal	MVA
	Impedancia	p.u
	Cambiador de Taps	%
	Perdidas	kW
	Relación de transformación	p.u
	Ángulo de fase del transformador	p.u
Líneas	Resistencia	p.u
	Reactancia	p.u
	Susceptancia	p.u
	Capacidad de la línea	MVA
Cargas	Perfil de demanda horaria	MW/h
	Factor de potencia	-
Barras	Nivel de voltaje	kV
	Ángulo de voltaje	Radianes
	Tipo de barra	-

4.2.2. Caracterización del evento

Para evaluar el impacto que provoca un evento adverso en el sistema eléctrico es necesario caracterizarlo. Debido a que un incendio forestal es una amenaza meteorológica es necesario recopilar registros históricos de las zonas afectadas e identificar los parámetros físicos y ambientales que determinan las zonas dónde es más propenso a ocurrir este tipo de eventos y que han ocurrido históricamente.

4.3. ETAPA DE EVALUACIÓN

4.3.1. Parametrización del evento

Para modelar la probabilidad de falla de un elemento del sistema eléctrico de potencia ante la ocurrencia de un incendio forestal, es crucial identificar los parámetros que intervienen al presentarse dicho evento, ya que se puede generar diferentes escenarios de riesgo. Estos parámetros incluyen factores físicos y ambientales que afectan directamente a la propagación del incendio, como se mencionó anteriormente. En este trabajo, al evaluar el sistema de transmisión, se utilizan los parámetros descritos en [26]. Estos parámetros proporcionan una

base sólida para el análisis de la vulnerabilidad de los conductores eléctricos en sistemas de transmisión aéreos frente a incendios forestales. A continuación, se detallan cada uno de los parámetros.

- **Pendiente del paisaje**

La pendiente [S] es un parámetro fundamental ya que la trayectoria de las líneas aéreas varía de acuerdo con la ubicación de la infraestructura según el relieve y la altitud del terreno. Para calcular la pendiente del paisaje, es esencial determinar la zona dónde se realiza el estudio. Utilizando herramientas de búsqueda como Google Earth y Google Maps, se puede identificar la ubicación de los elementos del sistema eléctrico que podrían verse afectados durante un incendio forestal.

En este trabajo es esencial identificar el trayecto de las líneas de transmisión, así como el número de torres que las soportan. Estas torres dividen las líneas en distintos tramos, lo que permite un análisis más detallado de la infraestructura como se puede apreciar en la Figura 4.3 la ubicación de las torres se obtiene en coordenadas georreferenciadas. Posteriormente se utiliza la ecuación 4.3 para el cálculo de la pendiente en el tramo dónde ocurre el incendio.

$$S = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (4.3)$$

Dónde:

S : es la pendiente

x_1, y_1 : el punto de ubicación de la torre de transmisión 1

x_2, y_2 : el punto de ubicación de la torre de transmisión 2

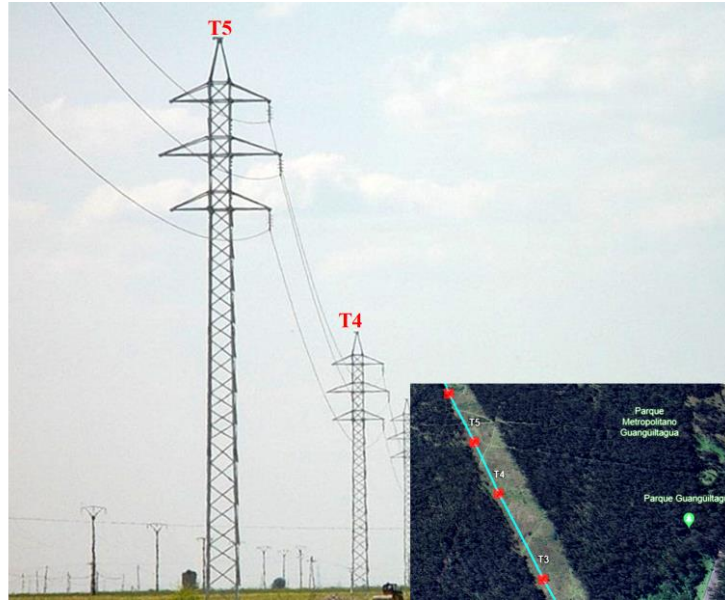


Figura 4.2 Ubicación de torres de transmisión en Google Earth.

- **Altura del conductor**

Dentro de este estudio, para determinar el impacto que provoca el incendio forestal en los sistemas de transmisión es necesario determinar el parámetro de altura del conductor [h] en metros [m], esta altura corresponde al conductor más bajo con respecto del suelo. Como indica la Tabla 4.2, para los sistemas de transmisión y subtransmisión se considera la altura de las torres de acuerdo con el nivel de voltaje.

Tabla 4.2 Altura de torres de transmisión de acuerdo con el nivel de voltaje [43].

Nivel de voltaje (kV)	Altura de la torre (m)	Altura conductor más bajo respecto al suelo (m)
138	30	16.5
46 y 69	18	12

- **Longitud de la llama**

La longitud de la llama [L_f] es un parámetro que puede proporcionar una cuantificación de la intensidad del incendio, puede indicar que tan rápido se da el efecto en el ambiente dependiendo del tipo de combustible y el tiempo [44]. En la Tabla 4.3 se presentan valores típicos que asocian la velocidad del viento, la longitud y la altura de la llama al tipo de combustible que comúnmente se puede encontrar en distintos ambientes utilizado en [45].

Tabla 4.3 Datos típicos de longitud de la llama en función del tipo de combustible y velocidad del viento.

Tipo de combustible	Vw (m/s)											
	0		3		6		8		11		14	
	lf(m)	H(m)	lf(m)	H(m)	lf(m)	H(m)	lf(m)	H(m)	lf(m)	H(m)	lf(m)	H(m)
1.Hierva corta	0.4	0.4	0.8	0.1	3.4	1.1	4.6	1.5	5.4	1.6	6.1	1.7
2.Madera (pasto y sotobosque)	0.6	0.6	1.6	0.5	4.0	1.6	5.6	2.4	6.5	2.5	7.3	2.7
3.Hierva alta	1.1	1.1	3.5	2.8	5.1	2.9	6.2	3.1	7.2	3.3	8.2	3.6
4.Chaparral	1.8	1.0	4.5	5.0	6.9	6.2	8.7	7.3	10.3	7.8	11.7	8.5
5.Matorral	0.5	0.5	1.8	0.6	4.3	1.9	5.9	2.8	6.9	2.9	7.8	3.2
6.Matorral inactivo, corteza de madera dura	0.6	0.6	2.0	0.8	4.2	1.7	5.6	2.4	6.5	2.6	7.4	2.8
7. Ásperos del sur	0.5	0.6	1.8	0.6	4.1	1.7	5.6	2.5	6.6	2.6	7.4	2.8
8. Madera caída (deposito)	0.2	0.2	0.3	0.01	0.4	0.02	0.5	0.02	0.6	0.02	0.7	0.02
9. Hojarasca de madera dura (pinos de puntas largas)	0.4	0.4	0.7	0.1	2.9	0.8	5.4	2.2	6.3	2.3	7.1	2.5
10.Madera (hojarasca y sotobosque)	0.6	0.6	1.8	0.7	5.0	2.8	7.0	4.2	8.2	4.5	9.3	4.9
11. Cortes de árbol ligero	0.4	0.4	0.9	0.2	4.2	1.8	6.1	3.1	7.2	3.3	8.1	3.5
12. Cortes de árbol medio	1.1	1.1	3.4	2.4	6.3	4.9	8.4	6.7	9.9	7.1	11.2	7.7
13.Cortes de árbol pesado	1.5	1.5	4.1	3.8	7.2	7.0	9.6	9.2	11.3	9.9	12.9	10.7

- **Índice de aridez del combustible**

En el contexto de los incendios forestales, un índice de aridez [*Ms*] mientras sea más alto, alto indica condiciones más secas y una mayor probabilidad de incendios, está relacionado con la severidad de la sequedad de los combustibles en una región específica y varía dependiendo la zona, ya que no todas las áreas presentan las mismas condiciones climáticas. Este índice se determina en función del clima y la temperatura local con valores como indica la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Valores de índice de aridez de acuerdo con el tipo de clima y vegetación [46].

Índice de aridez (%)	Tipo de clima	Vegetación
5-10	Árido	Desierto o escasa
11-25	Semiárido	Estepa Empinado
26-30	Árido moderado	Empinado
31-35	Semihúmedo	Bosque de hayas
36-40	Húmedo moderado	Bosque de robles
41-45	Húmedo	Bosque
46-50		Bosque conífero
51-55	Muy Húmedo	Subalpino
56-60		Alpino
>60	Extremadamente Húmedo	-

dirección del fuego. Para obtener información precisa sobre la velocidad del viento, es necesario recurrir a registros y reportes climáticos proporcionados por estaciones meteorológicas.

En Ecuador, el INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) ofrece informes detallados sobre las condiciones climáticas en diferentes regiones o zonas, incluyendo datos específicos sobre la velocidad del viento. Dentro de la investigación se recopila una muestra de datos históricos de 365 días del año 2023 en la zona del distrito metropolitano de Quito para utilizarlo en la ecuación de la probabilidad de falla.

Primero se determinó el rango de los datos, así como el número y los límites de los intervalos. Luego, se calculó la frecuencia y la marca de clase, lo que permitió graficar el histograma. Al tratarse de registros de velocidad del viento, como se puede observar en la Figura 4.4 el histograma obtenido del conjunto de datos se relaciona a una función de distribución de Weibull.

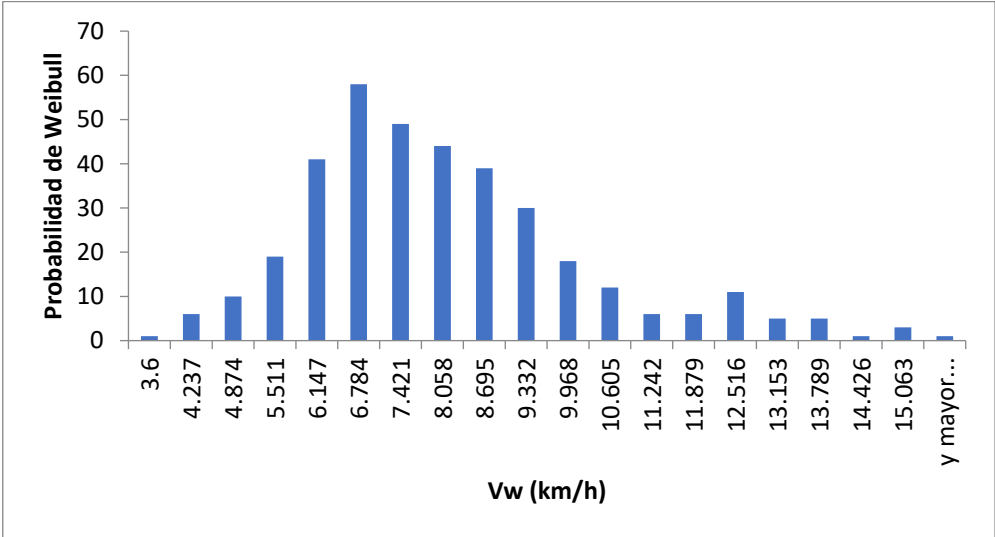


Figura 4.4 Distribución de datos históricos de Velocidad del viento

A partir de la función de distribución de Weibull se emplea el método de Montecarlo que permite determinar los valores más adecuados de velocidad del viento para este trabajo de investigación. La idea es normalizar el conjunto de datos que ya se obtuvo previamente y la simulación de Monte Carlo proporciona múltiples datos posibles y la probabilidad de cada una de estas a partir del conjunto de muestras de datos aleatorios como se indica en la Figura 4.5 los datos más adecuados con una probabilidad acertada del 0.97% son los que se encuentran entre 6 y 12 km/h. La Tabla 4.5 determina los valores más probables calculados a partir de la simulación Montecarlo.

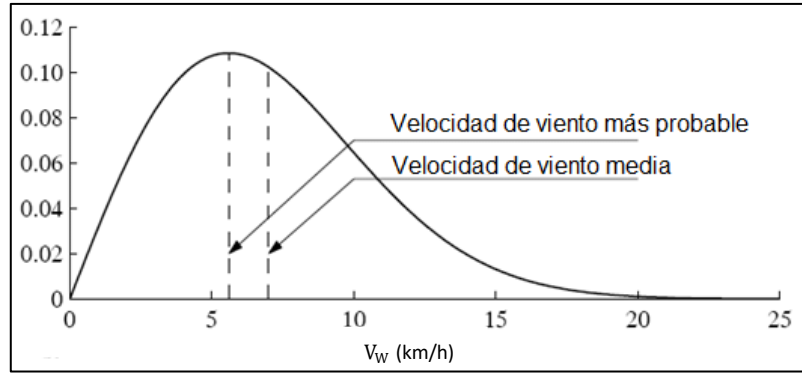


Figura 4.5 Curva normalizada de datos para simulación Montecarlo

Para el parámetro de velocidad del viento, se utilizan los valores de la Tabla 4.5, ya que son los más probables de acuerdo con el cálculo realizado a partir de la simulación de Montecarlo sobre los registros históricos.

Tabla 4.5 Velocidad del viento con tendencia más probable

Velocidad del viento (km/h)				
10.3	11.2	7.2	7.3	7.6
5.9	9.2	6.3	5.0	8.6
9.2	10.5	6.5	7.0	7.0
7.7	4.5	13.7	9.8	8.6
9.4	10.3	11.2	7.3	9.0
6.5	8.7	7.7	9.0	9.0
9.1	7.8	12.7	10.3	6.5

4.3.2. Modelación de falla

Para modelar la probabilidad de falla de conductores eléctricos en líneas de transmisión aéreas, es esencial determinar los valores de los parámetros físicos y ambientales que influyen en la ocurrencia de incendios forestales. Una vez obtenidos estos valores, como se indica en [26], se utiliza la ecuación 4.3 para el cálculo de la probabilidad de falla.

$$P(\text{failure}|S, M_s, F_D, V_w, h, L_f) = \frac{1}{1 + \exp[-l(S, M_s, F_D, V_w, h, L_f)]} \quad (4.3)$$

Dónde:

S : es la pendiente del paisaje

M_s : es el valor del índice de aridez

F_D : es la profundidad del combustible

V_w : es la velocidad del viento

h : altura del conductor con respecto a la fase más baja

L_f : es la longitud de la llama

$l(S, M_s, F_D, V_w, h, L_f)$ es el logaritmo de las probabilidades que, combinado con los parámetros físicos y ambientales, se puede representar en el siguiente formato como se muestra en la ecuación 4.4.

$$l(S, M_s, F_D, V_w, h, L_f) = a_0 + a_1(S) + a_2(M_s) + a_3(F_D) + a_4(V_w) + a_5(h) + a_6(L_f) \quad (4.4)$$

Los coeficientes a_0 hasta a_6 se obtienen de la regresión logística sobre una recopilación de muestras generadas para características físicas, ambientales de un incendio por tanto los valores calculados en [34] son tomados de la Tabla 4.5 para calcular el logaritmo en este trabajo.

Tabla 4.6 Coeficientes para cálculo del logaritmo [26].

Coeficientes	Valor
a_0	-0.5417
a_1	-0.1101
a_2	0.066312
a_3	-0.13069
a_4	-0.040483
a_5	-0.084872
a_6	1.7325

Una vez determinados los coeficientes para calcular el logaritmo de la ecuación 4.4 dado un conjunto de características físicas y ambientales, se puede calcular la probabilidad de falla de los conductores de líneas aéreas al complementarlo con la ecuación 4.3. Una vez calculada la probabilidad de falla (en este caso líneas de transmisión particularmente) frente a la ocurrencia de un evento adverso, se debe comparar con un valor umbral preestablecido. Para este trabajo, se establece un umbral del 50%. Si la probabilidad de falla de un elemento supera el umbral establecido al producirse un incendio forestal, se considera que la línea sale de servicio y esta indisponible. En caso contrario, si la probabilidad no supera dicho valor, la línea no se ve afectada y se mantiene disponible o en servicio. La Figura 4.6 ilustra un ejemplo de cómo se determina la disponibilidad del elemento afectado tras la ocurrencia del evento en un sistema.

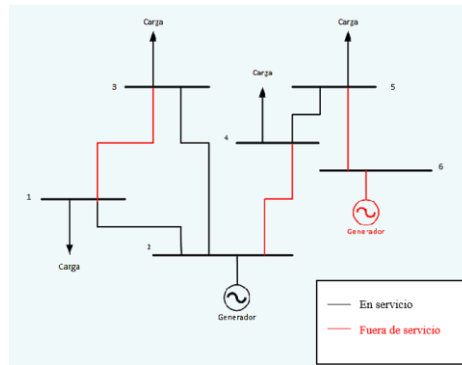


Figura 4.6 Disponibilidad de elementos eléctricos tras ocurrir un evento. Tomado de [48]

4.3.3. Respuesta del sistema eléctrico

Una vez que ocurre la falla, las condiciones operativas normales del sistema eléctrico se ven alteradas, creando una situación de contingencia. En este caso, es fundamental evaluar si el sistema puede mantener condiciones aceptables para el suministro eléctrico durante el tiempo que persista la falla. Existen diferentes modelos avanzados que permiten resolver problemas de optimización a partir de la obtención de resultados con diferentes métricas. Los modelos de flujo óptimo de potencia en sistemas eléctricos, conocidos en inglés como Optimal Power Flow (OPF), son muy comunes para resolver el problema de despacho económico. Entre ellos se encuentran el modelo OPF clásico, el OPF Altern Current (AC) y el OPF Direct Current (DC). Tanto el OPF AC como el OPF DC pueden ser formulados considerando o no las pérdidas en el sistema, lo que da lugar a modelos más o menos detallados según las necesidades del análisis.

En este trabajo, se utilizó un modelo OPF DC considerando pérdidas para determinar la respuesta del sistema eléctrico, utilizando la herramienta de optimización AMPL. Esta herramienta permite resolver problemas de optimización mediante la entrada de un código de modelo textual. En el siguiente apartado se presenta el modelo matemático empleado para evaluar la respuesta del sistema.

- **Modelo de Optimización**

Función objetivo

El modelo incluye una función objetivo que minimiza los costos de operación que incluyen costo de generación y costos de la energía no suministrada (ENS), sujeta a diversas restricciones que permiten resolver el flujo óptimo de potencia en un periodo de 24 horas que viene dado por σ .

$$\text{minimizar: } \sigma \sum_{t \in T} \sum_{i \in OB} (Af_i * Pg_i * C_i) + \sigma \sum_{t \in T} \sum_{i \in OB} (Pns_i * CENS) \quad (4.5)$$

Restricciones

Balance de potencia

La restricción garantiza que la suma de la potencia generada en cada barra y en cada periodo de tiempo sean igual a la demanda de cada barra y cada periodo incluyendo las pérdidas en las líneas y los flujos ,que se evalúa para cada barra [i] y para cada periodo [t].

$$Pg_{i,t} - Pd_{i,t} + \sum_{j,i \in OL} \left[Pa_{i,j,t} - \frac{Per_{i,j,t}}{2} \right] - \sum_{i,j \in OL} \left[Pa_{i,j,t} + \frac{Per_{i,j,t}}{2} \right] + Pns_{i,t} = 0; \forall i \in OB, \quad (4.6)$$

; \forall t \in T.

Flujo de potencia

La restricción establece que el flujo de potencia de la línea va a ser el producto de la relación de transformación y la suma de los ángulos en las barras y el ángulo desfasador ajustados por la reactancia del ramal, que se evalúa para cada ramal [i,j] en cada periodo [t].

$$Pa_{i,j,t} = a_{i,j} * \left[\frac{th_{i,t} - th_{j,t} + fi_{i,j}}{x_{i,j}} \right]; \forall i,j \in OL, \forall t \in T. \quad (4.7)$$

Perdidas

La restricción establece que las perdidas van a ser al producto de la conductancia por la sumatoria de 1 más la relación de transformación al cuadrado, menos 2 veces la relación de transformación, más el producto del flujo de potencia al cuadrado y reactancia al cuadrado sobre la relación de transformación, que se evalúa para cada ramal [i,j] y para cada periodo [t].

$$Per_{i,j,t} = g_{i,j} * [1 + a_{i,j}^2] - 2a_{i,j} + \left[Pa_{i,j,t}^2 * \frac{x_{i,j}^2}{a_{i,j}} \right]; \forall i,j \in OL, \forall t \in T. \quad (4.8)$$

Límites de Potencia

La restricción establece que la potencia generada de cada unidad de generación no puede superar el límite de potencia mínima y el producto de la potencia máxima y la disponibilidad de generación, que se evalúa en cada barra [i] y en cada periodo [t].

$$Pgmin_i \leq Pg_{i,t} \leq Pgmax_i * Ug_{i,t}; \forall i \in OB, \forall t \in T. \quad (4.9)$$

Límites de voltaje

La restricción establece que el voltaje en cada barra [i] no puede supera el límite de voltaje mínimo y el voltaje máximo, que se evalúa en cada barra [i] y en cada periodo [t].

$$Vmin_i \leq V_{i,t} \leq Vmax_i; \forall i \in OB, \forall t \in T. \quad (4.10)$$

Límites de ángulo

La restricción establece que el ángulo en cada barra [i] no puede supera el límite mínimo y máximo de theta, que se evalúa en cada barra [i] , cada valor[o] y en cada periodo [t].

$$-theta \leq th_{i,t} \leq theta; \forall i \in OB, \forall t \in T. \quad (4.11)$$

Límites de Flujo

La restricción establece que el flujo de potencia en cada ramal no puede superar el producto de la capacidad del ramal [i,j] y disponibilidad del ramal [i,j] y menos la capacidad del ramal [i,j] y disponibilidad del ramal [i,j], que se evalúa en cada ramal [i,j] y en cada periodo [t].

$$Smax_{i,j,t} * UL_{i,j,t} \leq Pa_{i,j,t} \leq -Smax_{i,j,t} * UL_{i,j,t}; \forall i,j \in OL, \forall t \in T. \quad (4.12)$$

Límites de energía no Suministrada

La restricción establece que la energía no suministrada en cada barra [i] y en cada periodo [t] ,debe ser menor a la potencia demandada en cada barra [i] y cada periodo [t], que se evalúa en cada barra [i] y en cada periodo [t].

$$0 \leq Pns_{i,t} \leq Pd_{i,t}; \forall i \in OB, \forall t \in T. \quad (4.13)$$

El modelo de optimización descrito genera resultados que permiten cuantificar distintas métricas de resiliencia que son clave para determinar la respuesta del sistema eléctrico. Por ejemplo, los resultados obtenidos del modelo permiten determinar la cantidad de energía que no se suministra al sistema durante un determinado tiempo, cuando ocurre una falla en las líneas

de transmisión y estas salen de servicio debido a un incendio forestal. En base en este tiempo, se pueden establecer criterios para estimar la hora de recuperación del sistema y la reanudación del suministro eléctrico. Como se mencionó en el capítulo 3, para evaluar la resiliencia del sistema eléctrico se emplean las métricas FLEP basadas en la curva del trapecioide de resiliencia y el índice de falta de confiabilidad de energía (EIU).

4.4. ETAPA DE FORTALECIMIENTO

Esta subsección describe diversas estrategias que pueden implementarse para mitigar el impacto de incendios forestales en las líneas de transmisión. Se considera las estrategias más relevantes para la investigación a partir de los resultados obtenidos de la respuesta del sistema eléctrico y se evalúa su efectividad.

4.4.1. EVALUACIÓN DE ESTRATEGIAS DE MEJORA

Entre las estrategias más efectivas se encuentran los métodos de prevención de fallas, como la implementación de sistemas de protección avanzados, el control operacional y la gestión de vegetación, que tienen el objetivo de reducir la probabilidad de falla o menorar el tiempo de duración de estos eventos. Modelar y cuantificar el riesgo de incendios forestales es fundamental para que las empresas de servicios públicos comprendan los riesgos y fortalezcan de manera estratégica la red eléctrica.

- **Vigilancia de incendios**

El monitoreo continuo de áreas propensas a incendios mediante tecnología avanzada es una estrategia efectiva para la detección temprana de incendios forestales. Esta tecnología incluye el uso de sensores remotos, cámaras de vigilancia térmica y drones equipados con sistemas de visión y detección de calor, que permiten la identificación rápida de focos de incendio.

El despliegue de estas herramientas en tiempo real posibilita una respuesta inmediata y coordinada, lo que es crucial para controlar un incendio antes de que se propague y cause daños significativos. Además, la vigilancia continua permite mantener un control constante sobre las áreas de mayor riesgo, garantizando que las medidas preventivas se efectúen de manera rápida.

- **Operación proactiva**

Un componente clave de la operación proactiva es la planificación y coordinación de cuadrillas de respuesta rápida. Mediante el análisis predictivo y el monitoreo continuo, se pueden identificar rutas de acceso óptimas y caminos seguros para que estas cuadrillas lleguen de manera eficiente a las zonas afectadas por un incendio. Al conocer previamente los accesos y la topografía del terreno, se reduce el tiempo de respuesta, permitiendo una intervención más rápida y efectiva para proteger el sistema de transmisión.

- **Gestión de vegetación**

El manejo de la vegetación es una estrategia crucial para la prevención de incendios forestales, especialmente en áreas donde la infraestructura eléctrica es vulnerable. Con el avance de la tecnología, el uso de drones y la captura de imágenes aéreas han permitido a las empresas desarrollar planos de acción más eficaces y rápidos, lo que reduce significativamente los tiempos de falla de las líneas de transmisión durante estos eventos. El desbroce continuo de la vegetación en zonas donde la infraestructura es más propensa a incendios forestales puede crear una franja de servidumbre. Esta franja actúa como una barrera que limita el crecimiento de los incendios, al reducir la cantidad de combustible disponible. De esta manera, se minimiza la duración y el impacto del incendio en los sistemas de transmisión.

Para este trabajo de investigación, las estrategias de mitigación adoptadas permitirán reducir el tiempo de desconexión de las líneas de transmisión, en este caso los planes de mejora permiten tomar medidas más adecuadas para resolver la situación emergente en un tiempo en el que el suministro eléctrico no se vea tan afectado, esto permite reducir el impacto de los incendios forestales a la red eléctrica.

4.5. CASO DE ESTUDIO

En este apartado se define cual será la red eléctrica y la zona geográfica dónde se llevará el estudio, proporcionando un enfoque claro para este trabajo. Se detallan las fuentes de datos y las características técnicas necesarias para analizar el caso de estudio. Además, se describe en profundidad el caso de estudio seleccionado, incluyendo el contexto y las condiciones específicas del área de interés. Asimismo, se explica la aplicación de la metodología propuesta

para analizar los diferentes escenarios del caso de estudio con el fin de determinar los resultados de este trabajo.

4.5.1. RED DE PRUEBA

Para evaluar la resiliencia del sistema de transmisión, en este trabajo se utilizó un modelo de red eléctrica real, la misma que se tomó del diagrama unifilar de la Empresa Eléctrica Quito S.A., entidad responsable de la generación, subtransmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica en la ciudad de Quito y su área de concesión. El acceso al diagrama unifilar y los datos del sistema permitieron modelar la red de transmisión (138 kV) y subtransmisión (46 y 69 kV) en el software DIGSILENT Power Factory, herramienta que requiere una configuración previa de los parámetros de cada elemento para garantizar que la simulación del modelo sea válida y refleje la operación del sistema real. Los parámetros de generadores, transformadores, líneas de transmisión y cargas, tomados para modelar el sistema en el software se pueden encontrar detallados en el Anexo 1.

- **Perfil de demanda**

Como es de conocimiento general, la demanda de energía eléctrica es dinámica y varía con el tiempo. De manera similar, un incendio forestal es un evento que tiene una duración específica, con registros de inicio y finalización. Para determinar la respuesta del sistema eléctrico en esta investigación, se modeló la demanda eléctrica en periodos de tiempo de 24 horas, utilizando como referencia un perfil de demanda semanal típico del sistema eléctrico de Ecuador, el mismo que se muestra en la Figura 4.7.

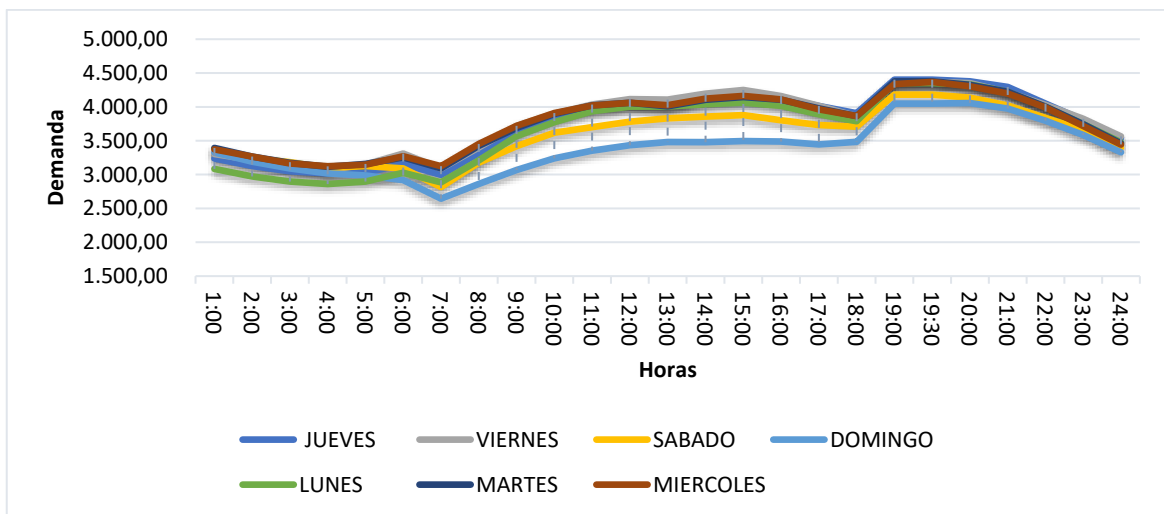


Figura 4.7 Perfil de demanda Sistema Eléctrico de Ecuador.

Posteriormente, en la Tabla 4.7 se presentan los datos de la demanda de cada subestación en el escenario de un día laboral. Estos datos se utilizan para calibrar el sistema modelado en el software y generar los perfiles de demanda específicos para cada barra del sistema eléctrico de prueba.

Tabla 4.7 Demanda de la red de prueba en escenario de día laboral

Subestación	Demanda	Nivel de carga	Subestación	Demanda	Nivel de carga
	[MW]	[%]		[MW]	[%]
01. Olímpico	14,07	70,35	23. Conocoto T1	27,04	81,3
02. Luluncoto	5,71	28,55	24. Carolina	13,15	65,75
03. Barrionuevo T1	11,02	55,10	26. Alangasí	16,00	48,48
03. Barrionuevo T2	5,65	28,25	27. San Rafael	9,71	29,42
04. Chimbacalle	11,21	56,05	28. Ñaquito T1	8,11	40,55
05. Chilibulo	9,30	28,18	28. Ñaquito T2	7,27	36,35
06. Escuela Sucre	3,37	33,70	29. Cumbayá	19,25	58,33
07. San Roque	10,30	51,50	30. Plataforma Financiera	0,77	7,7
08. La Marín	5,41	54,10	31. Tababela	16,94	51,33
09. Miraflores	5,71	57,10	32. Diez Nueva	10,7	53,5
10. Diez Vieja	5,31	53,10	33. Nuevo Aeropuerto	6,31	31,55
11. Belisario Quevedo	9,19	45,95	36. Tumbaco T1	21,86	66,24
12. La Floresta	8,53	42,65	36. Tumbaco T2	6,05	30,25
13. Granda Centeno	12,12	60,60	37. Santa Rosa T1	21,99	66,64
14. Gualo	22,47	68,09	37. Santa Rosa T2	11,43	57,45
15. El Bosque	12,55	62,75	42. Papallacta Móvil	5,49	32,29
16. Rio Coca T1	10,53	52,65	49. Los Bancos	7,56	47,25
16. Rio Coca T2	11,31	56,55	53. Pérez Guerrero	10,42	65,13
17. Andalucía	11,36	56,8	55. Sangolquí T1	14,18	73,12
18. Cristianía T1	20,20	61,21	55. Sangolquí T2	20,89	64,6
18. Cristianía T2	15,22	46,12	57. Pomasqui T1	24,45	74,09
19. Cotocollao T2	25,01	75,79	57. Pomasqui T2	27,52	81,97
19. Cotocollao T3	19,76	59,88	58. Quinche	13,44	40,73
21. Epiclachima T1	17,75	53,79	59. Eugenio Espejo T1	25,88	80,77
21. Epiclachima T2	20,23	61,30	59. Eugenio Espejo T2	11,65	35,3
22. San Antonio	10,88	32,97	Adelca	34,00	70,1

Para obtener los perfiles de demanda a partir de la curva general, se emplea un proceso de escalamiento y ajuste que toma en cuenta las características particulares de la demanda de cada barra. Este enfoque asegura que la simulación refleje de manera precisa las condiciones operativas y los desafíos que enfrenta la red de estudio. Los perfiles de demanda, ilustrados en las Figuras 4.8, 4.9, 4.10 y 4.11, se analizan durante un periodo de 24 horas para evaluar con precisión la respuesta del sistema.

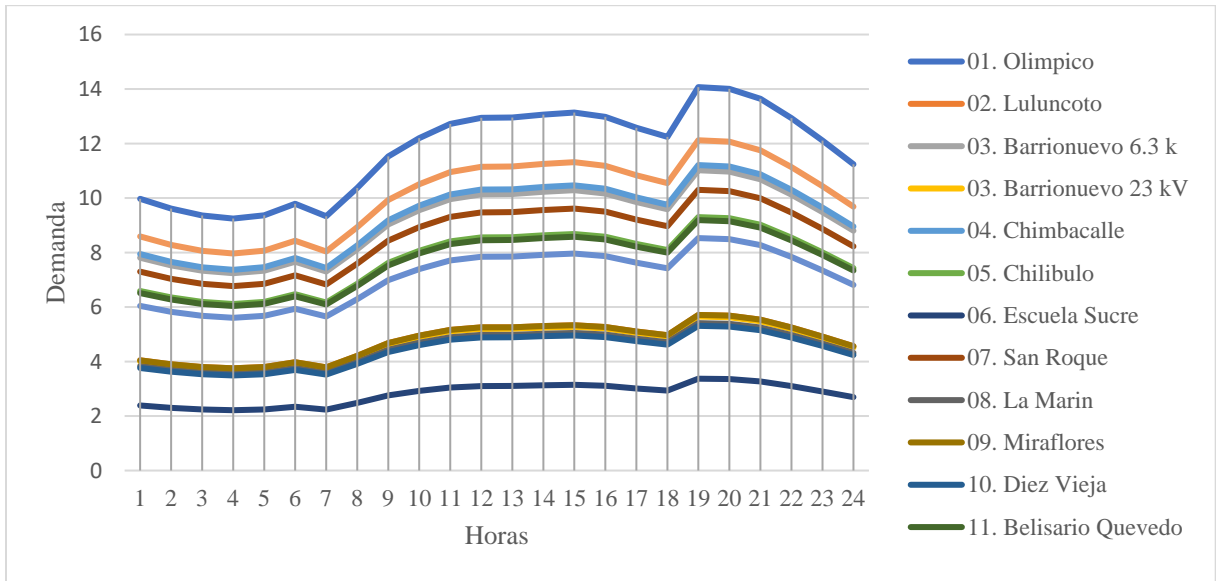


Figura 4.8 Perfil de demanda de S/E Olímpico a S/E Granda centeno

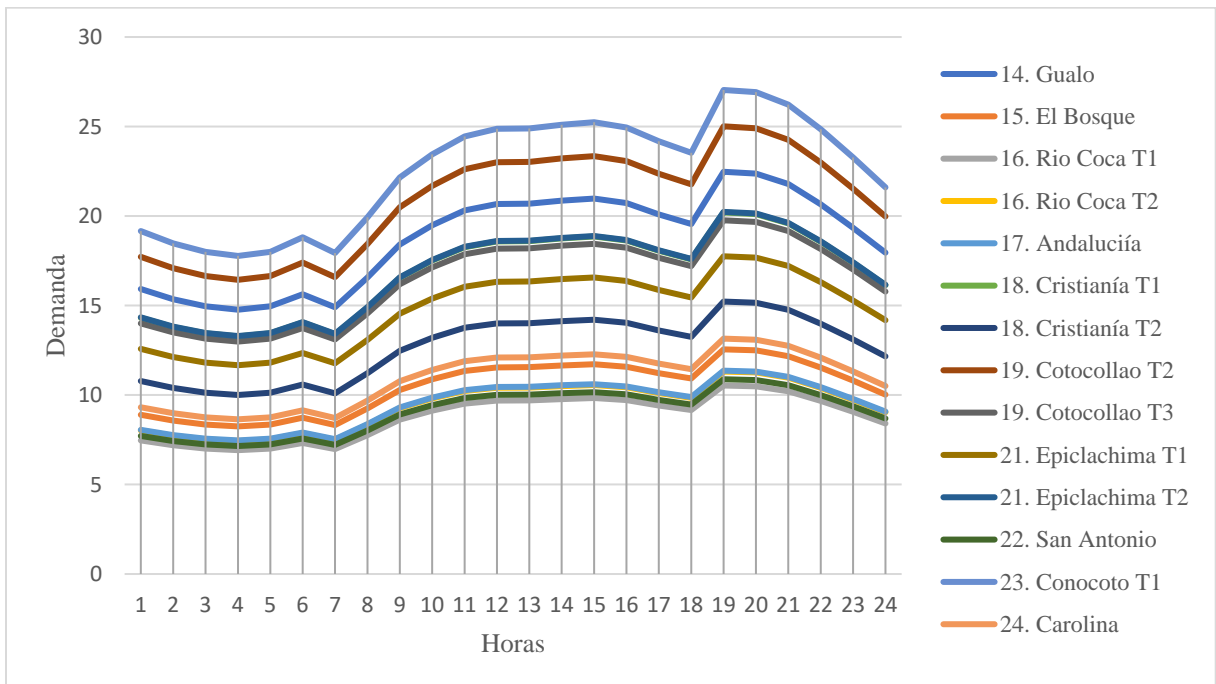


Figura 4.9 Perfil de demanda de S/E Gualo a S/E Carolina

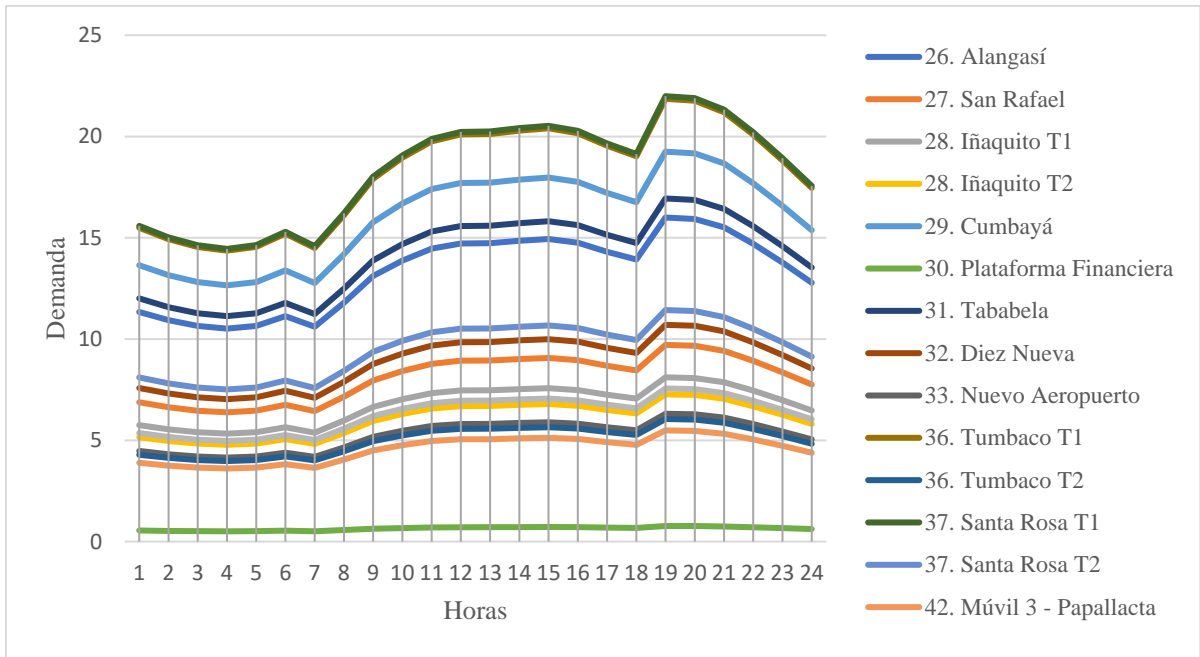


Figura 4.10 Perfil de demanda de S/E Alangasí a S/E Los Bancos

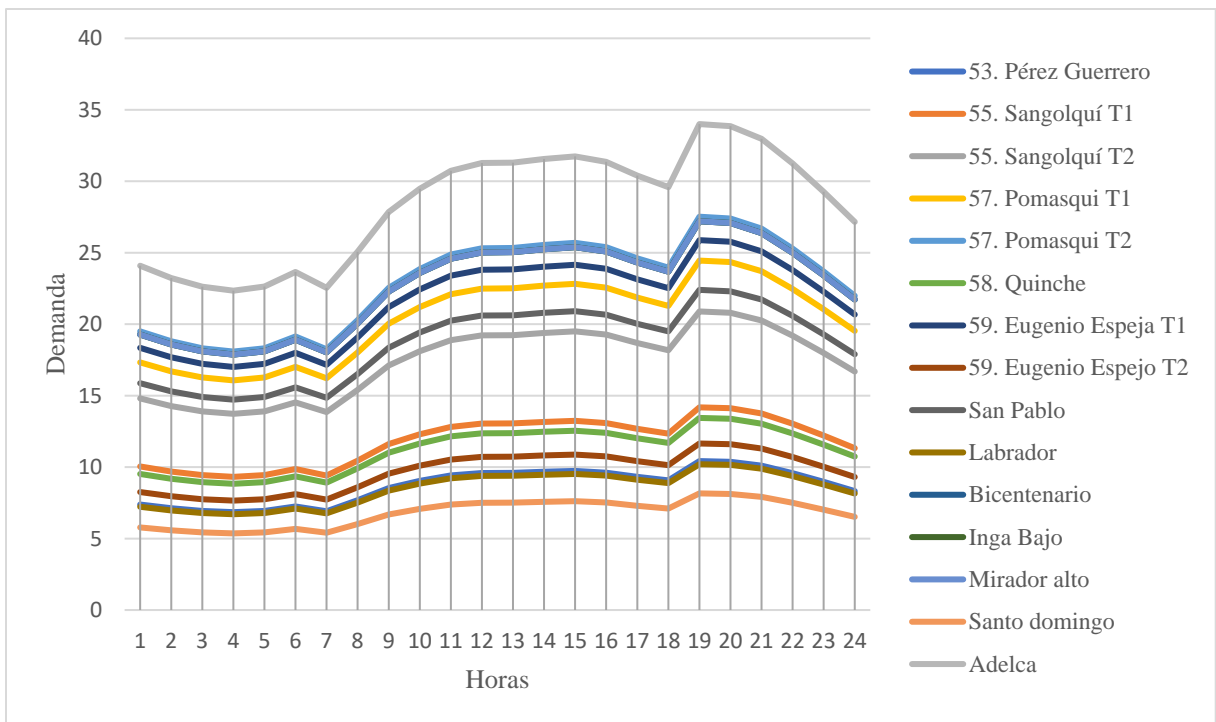


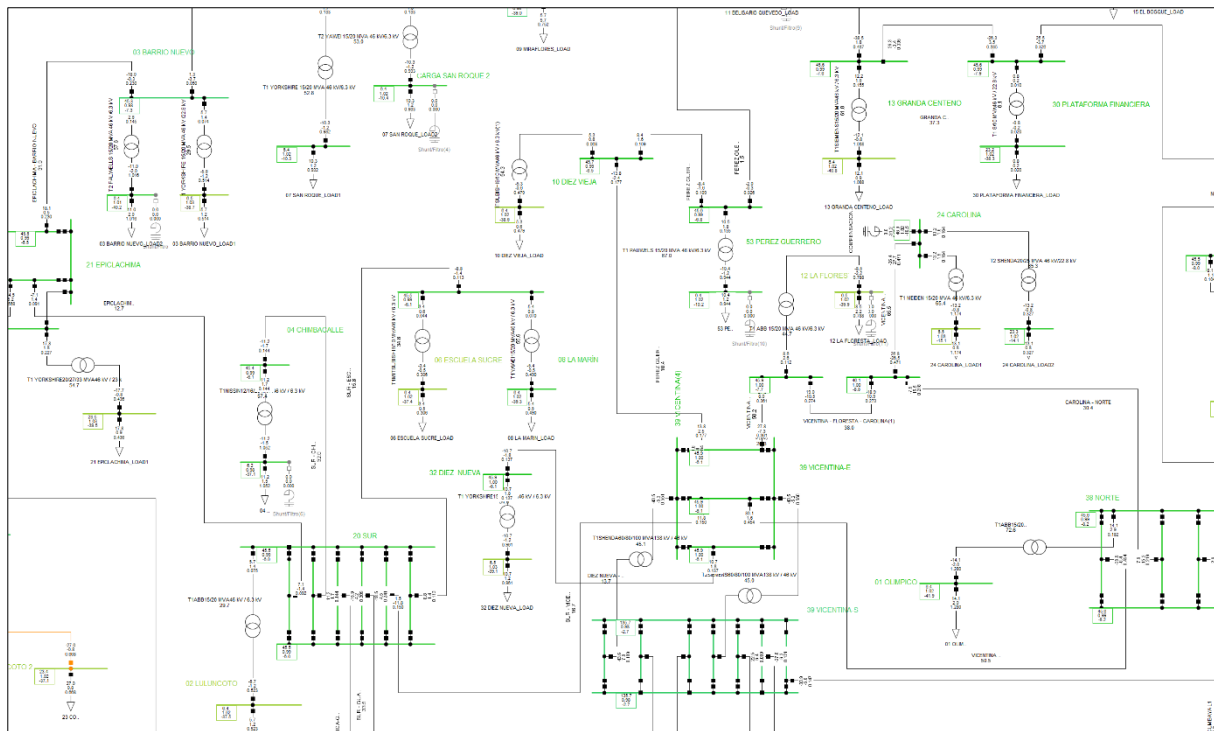
Figura 4.11 Perfil de demanda de S/E Pérez Guerrero a S/E Adelca

Una vez configurada toda la red eléctrica como muestra la Figura 4.12, con la base de datos proporcionada por el ente operador, se procedió a realizar la simulación y correr flujos de

potencia como se presenta en la Figura 4.13. El diagrama unifilar completo del sistema modelado se puede encontrar en el Anexo 2.

Nombre	Red	Terminal i StaCubic	Terminal i Barras	Terminal j StaCubic	Terminal j Barras	u, Magnitud Terminal i in p.u.	u, Magnitud Terminal j in p.u.
ALANGASI - EL CARMEN	DIAGRAMA EEQ		EL CARMEN		26 ALANGASI	0.9988879976	0.999060821
ALANGASI - EL INGA	DIAGRAMA EEQ		EL INGA_TRANS...		26 ALANGASI	0.9999238001	0.999060821
ANDA LUCIA - EL BOSQUE	DIAGRAMA EEQ		15 EL BOSQUE		17 ANDALUCIA	0.9910759931	0.992502481
BOSQUE - RIO COA	DIAGRAMA EEQ		BOSQUE - RIO C...		15 EL BOSQUE	0.9837372326	0.991075999
CAROLINA - NORTE	DIAGRAMA EEQ		CAROLINA-NOR...		38 NORTE(2)	1.0021060516	0.990329001
COTOCOLLAO - ANDA LUCIA	DIAGRAMA EEQ		17 ANDALUCIA		COTOCOLLAO - ...	0.9925024856	1.001269999
COTOCOLLAO - LOS BANCOS	DIAGRAMA EEQ		COTOCOLLAO - ...		49 LOS BANCOS	1.0006230207	0.999269288
COTOCOLLAO - LOS BANCOS(1)	DIAGRAMA EEQ		COTOCOLLAO - ...		COTOCOLLAO - ...	1.0012699945	1.000623021
COTOCOLLAO - POMASQUI CELEC SNI	DIAGRAMA EEQ		POMASQUI CEL...		19 COTOCOLLAO	0.9965432005	0.992314551
CUMBAYA - NAYON	DIAGRAMA EEQ		80 CUMBAYA(4)		86 NAYON	0.9894432796	0.984881239
CUMBAYA - TUMBACO	DIAGRAMA EEQ		36 TUMBACO		80 CUMBAYA(2)	0.9849318212	0.989443271
DIEZ NUEVA - VICENTINA	DIAGRAMA EEQ		32 DIEZ NUEVA		39 VICENTINA(2)	0.9980732016	0.998125161
EL INGA - EL INGA BAJO	DIAGRAMA EEQ		EL INGA_TRANS...		46 EL INGA BAJO	0.9999238001	0.998065107
EL INGA - EL QUINCHE	DIAGRAMA EEQ		58 EL QUINCHE		EL INGA_TRANS...	0.9967059037	0.999923800
EL OBRAJE - ADELCA	DIAGRAMA EEQ		ADELCA		SANTA ROSA - ...	0.9906121565	0.992595987
EPICLACHIMA - BARRIO NUEVO	DIAGRAMA EEQ		21 EPICLACHIM...		03 BARRIO NUE...	0.9890732786	0.984508700
EPICLACHIMA - SUR	DIAGRAMA EEQ		20 SUR		21 EPICLACHIM...	0.9896773136	0.989073271
GNGPLO. TÉRMICA - GNGPLO HIDRA	DIAGRAMA EEQ		82 GUALBERTO ...		84 GUANGOPOL...	0.9908816404	0.991499951
GRANDA CENTENO - PLATAFORMA FINANCIERA	DIAGRAMA EEQ		30 PLATAFORM...		13 GRANDA CE...	0.9918781740	0.992348581
GRANDA CENTENO - SELVA ALEGRE	DIAGRAMA EEQ		13 GRANDA CE...		41 SELVA ALEGR...	0.9923485861	0.998070121
GUALO - POMASQUI CELEC SNI	DIAGRAMA EEQ		14 GUALO		POMASQUI CEL...	0.9880499067	0.996543200
GUANGOPOLO(1)	DIAGRAMA EEQ		GUANGOPOLO		39 VICENTINA-S...	0.9845799772	0.983555291
INGA BAJO - TABABELA	DIAGRAMA EEQ		31 TABABELA		46 EL INGA BAJO	0.9962829716	0.998065107
LOS BANCOS - PALMIRA	DIAGRAMA EEQ		PALMIRA		SANTO DOMIN...	0.9952828706	0.977331481
LOS BANCOS - SANTO DOMINGO	DIAGRAMA EEQ		CARGA SANTO ...		SANTO DOMIN...	0.9645715188	0.977331481
LT_SANTA ROSA - POMASQUI C2	DIAGRAMA EEQ		TRANSELECTRIC		COLOMBIA INTE...	1.0000000001	1.000000000

Figura 4.12 Datos de la red de prueba en software DigSILENT Power Factory



4.5.2. DELIMITACIÓN CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio se centra en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) debido a que es una zona con áreas boscosas propensas a un alto índice de incendios forestales. Según registros históricos de fallas por incendios forestales de la EEQ, entre 2001 y 2024 se registraron 71 incendios forestales que causaron diferentes efectos en la infraestructura eléctrica, cuya distribución se detalla a continuación en la Figura 4.10. Se reportaron varias fallas en el sistema como la salida de líneas y la desconexión tanto automática como manual de disyuntores y seccionadores en distintas subestaciones. Los incendios fueron provocados, y su propagación, combinada con factores ambientales, generaron fallas afectando la red eléctrica durante periodos de hasta 7 horas aproximadamente.

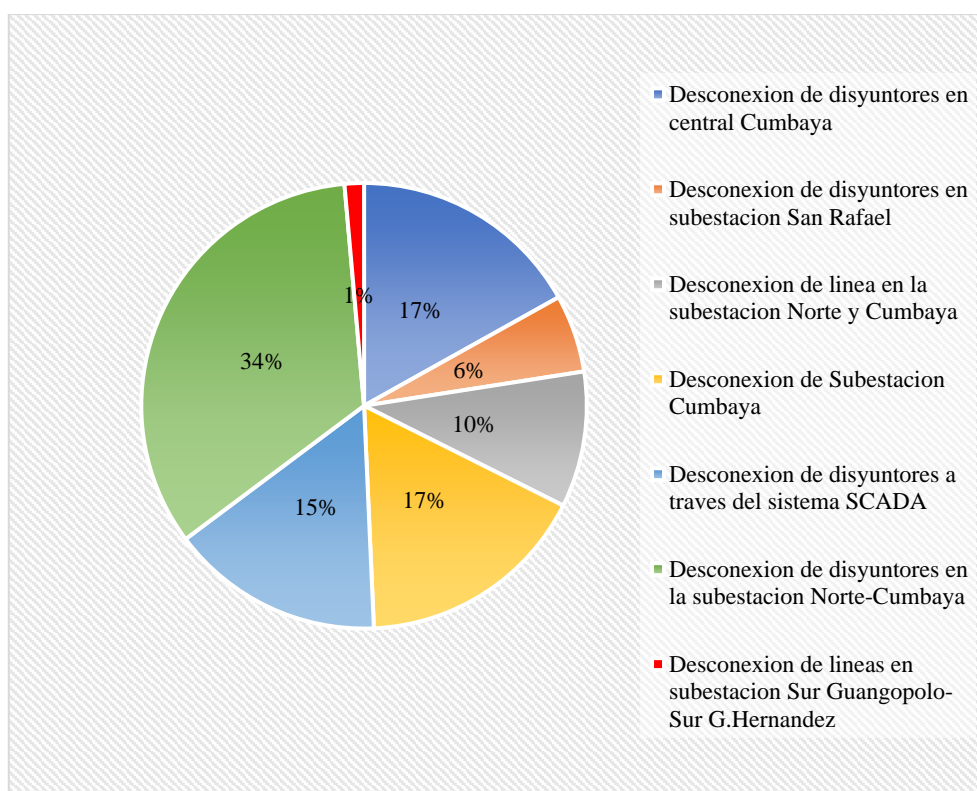


Figura 4.14 Registros históricos de incendios forestales que afectara la red eléctrica de Quito

El caso de estudio se basa en los registros históricos de incendios forestales significativos que afectaron la red eléctrica de Quito con más frecuencia, en la Tabla 4.8 se detalla los elementos afectados y los periodos de duración del incendio. El detalle de los registros de incendios se puede encontrar en el Anexo 3.

Tabla 4.8 Registros históricos de incendios forestales que afectaron la red eléctrica de Quito

Fecha Falla	Hora Inicial	Hora Final	Duración incendio (H)	Elemento Afectado
08/21/01	11:20:00	12:55:00	1,58	Central Cumbayá
08/25/01	16:30:00	18:00:00	1,5	Línea de subtransmisión 46KV San Rafael -Sangolquí -Pasochoa
08/23/02	14:56:00	16:28:00	1,53	Línea de subtransmisión 46KV S/E Norte - Cumbayá
09/13/09	12:46:00	15:20:00	2,56	Líneas de subtransmisión 46 KV S/E Cumbayá - S/E Tumbaco y S/E Cumbayá - S/E Nayon
09/03/12	15:27:00	16:15:27	0,8	Línea de subtransmisión 46 kV S/E Nayon - S/E Nuevo Aeropuerto
09/22/13	14:36:42	16:18:11	1,69	Desconexión manual (SCADA) Disyuntores 52-5 Y 52-6
09/22/13	14:38:15	16:17:43	1,65	Disyuntor del primario (SCADA).
09/22/13	23:30:40	0:37:01	1,1	Líneas de subtransmisión S/E Norte- S/E Cumbayá
07/20/24	13:27:09	13:46:00	0,31	Línea subtransmisión Sur - Guangopolo / Línea Sur - Gualberto Hernández

4.5.3. ESCENARIOS DEL CASO DE ESTUDIO

Los escenarios considerados para este trabajo se centran en la evaluación del impacto de incendios forestales en las líneas de transmisión, ya que la metodología propuesta permite determinar la probabilidad de falla en conductores de líneas aéreas. Por lo tanto, se plantean 4 escenarios de desconexión de líneas de transmisión del sistema de prueba, como se indica en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9 Líneas de transmisión para caso de estudio.

L/T para caso de estudio	Voltaje	Incendio forestal	
		Hora Inicio	Hora Finalización
Línea Adelca- El obraje	138kV	14:00	17:00
Línea Santa Rosa-El obraje		11:00	14:00
Línea Papallacta – Papallacta Móvil		15:00	19:00
Líneas Mirador alto – Conocoto / Mirador alto – Santa rosa		13:00	19:00

Como ya se mencionó en la sección 4.3 una vez caracterizada la zona dónde se realiza el caso de estudio es necesario calcular los parámetros y la probabilidad de falla para evaluar la respuesta del sistema. Cada escenario va a variar sus características ya que fueron ajustadas de acuerdo con el trayecto de la línea de transmisión.

- **Determinación de parámetros para el caso de estudio**

Altura del conductor, Índice de aridez y Profundidad del combustible

Como se mencionó en la Sección 4.3 estos parámetros son necesarios calcularlos ya que se pueden tomar los valores aceptables dependiendo de la zona dónde se realiza el estudio. Para la altura de los conductores se considera la altura de la fase más baja con respecto al suelo para las estructuras de 138 kV, los valores se encuentran establecidos en la Tabla 4.3. Para el índice de aridez y la profundidad del combustible dependiendo de la vegetación que se encuentre en la zona dónde pasa la infraestructura eléctrica se toma los valores de la Tabla 4.4.

Pendiente

Con la ayuda de Google Earth se localizó la trayectoria de las líneas y se identificaron los tramos identificados por T, que atraviesan zonas boscosas propensas a incendios forestales. Se utilizaron las coordenadas de las torres de transmisión para calcular las pendientes de cada tramo mediante la ecuación 4.3. Los valores obtenidos se detallan en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10 Pendiente de cada tramo de la L/T Adelca – El obraje

L/T Papallacta - Papallacta móvil		L/T Adelca - El Obraje		L/T M. Alto - Conocoto		L/T M. Alto - Santa Rosa		L/T Santa Rosa - El Obraje	
Tramo	S [grados]	Tramo	S [grados]	Tramo	S [grados]	Tramo	S [grados]	Tramo	S [grados]
T1-T2	-0.333	T1-T2	-0.400	T1-T2	0.167	T1-T2	0.666	T14-T15	0.167
T2-T3	-1.000	T2-T3	3.669	T2-T3	0.400	T2-T3	0.250	T15-T16	0.100
T3-T4	1.996	T3-T4	3.996	T3-T4	0.667	T3-T4	0.667	T16-T17	0.091
T4-T5	1.000	T4-T5	7.022	T4-T5	0.333	T4-T5	0.750	T17-T18	0.273
-	-	T5-T6	3.996	T5-T6	0.333	T5-T6	0.167	T18-T19	0.091
-	-	T6-T7	4.996	T6-T7	0.500	T6-T7	0.285	T19-T20	0.158
-	-	T7-T8	0.500	T7-T8	0.500	T7-T8	0.286	T20-T21	0.125
-	-	T8-T9	0.909	T8-T9	0.666	T8-T9	0.200	T21-T22	0.400
-	-	T9-T10	-5.996	T9-T10	0.167	T9-T10	0.285	T22-T23	0.571
-	-	T10-T11	-8.022	T10-T11	0.800	T10-T11	0.167	T23-T24	0.778
-	-	T11-T12	-0.778	T11-T12	-0.334	T11-T12	0.308	T24-T25	0.666
-	-	T12-T13	-2.331	T12-T13	-0.666	T12-T13	0.273	T25-T26	0.286
-	-	T13-T14	-2.001	T13-T14	0.500	T13-T14	0.222	T26-T27	0.333
-	-	T14-T15	0.499	T14-T15	0.600	T14-T15	0.334	T27-T28	0.250
-	-	-	-	T15-T16	0.000	T15-T16	0.249	T28-T29	0.444
-	-	-	-	T16-T17	0.750	T16-T17	0.250	T29-T30	0.444
-	-	-	-	T17-T18	1.000	T17-T18	0.364	T30-T31	0.444
-	-	-	-	T18-T19	0.500	T18-T19	0.222	T31-T32	0.455
-	-	-	-	T19-T20	0.501	T19-T20	0.154	T32-T33	0.167
-	-	-	-	T20-T21	0.722	T20-T21	0.100	T33-T34	0.136

-	-	-	-	T21-T22	0.500	T21-T22	0.444	T34-T35	0.143
-	-	-	-	-	-	-	-	T35-T36	0.333
-	-	-	-	-	-	-	-	T36-T37	0.249
-	-	-	-	-	-	-	-	T37-T38	0.250
-	-	-	-	-	-	-	-	T38-T39	0.308
-	-	-	-	-	-	-	-	T39-T40	-0.428
-	-	-	-	-	-	-	-	T40-T41	-0.143
-	-	-	-	-	-	-	-	T41-T42	-0.125
-	-	-	-	-	-	-	-	T42-T43	-0.143
-	-	-	-	-	-	-	-	T43-T44	-0.667
-	-	-	-	-	-	-	-	T44-T45	-0.500
-	-	-	-	-	-	-	-	T45-T46	-0.572
-	-	-	-	-	-	-	-	T46-T47	-1.000
-	-	-	-	-	-	-	-	T47-T48	-0.501
-	-	-	-	-	-	-	-	T48-T49	0.000

Longitud de la llama

La longitud de la llama varía en cada periodo de tiempo de acuerdo con la velocidad del viento y el tipo de combustible, de forma que los tramos de las líneas de transmisión están en diferentes zonas, los valores varían para cada escenario como indica el ejemplo de la L/T Papallacta – Papallacta Móvil en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11 Longitud de llama en escenario L/T Papallacta-Papallacta Móvil

L/T	Zona	Tipo de combustible	Tramo	Periodo (Horas)	L_f [m]
Línea Papallacta-Papallacta Móvil	1	Matorral	T1-T2	1	0.8
				2	0.75
			T2-T3	1	0.8
				2	0.75
	2	Chaparral	T3-T4	1	2.5
				2	2.3
	3	Matorral	T4-T5	1	0.8
				2	0.75

Velocidad del viento

La velocidad del viento es un parámetro que varía igualmente en el tiempo y para el caso de estudio se analiza la probabilidad de falla en periodos de 2 horas por lo que los valores para cada zona más probables se establecen en la Tabla 4.12 a partir de la simulación de Montecarlo calculados previamente en la sección 4.3.

Tabla 4.12 Velocidad del viento para escenarios del caso de estudio

L/T	Período (Horas)	V_w [km/h]
Línea Papallacta- Papallacta Móvil	1	7
	2	6.5
Línea Adelca - El Obraje	1	11
	2	11.2
Línea Alto - Conocoto	1	9
	2	9.21
Línea M. Alto - Santa Rosa	1	9
	2	9.21
Línea Santa Rosa-El Obraje	1	10
	2	10.3

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo, se detallan los resultados obtenidos del caso de estudio propuesto para el análisis de la resiliencia del sistema de transmisión. A continuación, en la sección 5.1 se determina el cálculo de la probabilidad de falla y con ese análisis se determina la disponibilidad de las líneas de transmisión en cada escenario. La Sección 5.2 se realiza la evaluación del trapecio de resiliencia para los diferentes escenarios, se detalla la energía no suministrada y las diferentes métricas de resiliencia en cada uno de los escenarios, mientras que la Sección 5.3 presenta la comparación de los resultados de costos totales, potencia demandada y energía no suministrada obtenidos en cada uno de los softwares.

5.1. RESULTADOS DE LA PROBABILIDAD DE FALLA

Una vez que se han determinado los parámetros necesarios para evaluar el impacto que presentan los incendios forestales en el sistema de transmisión, ya se puede calcular la probabilidad de falla y determinar cuáles son los efectos que tiene la red de prueba. A continuación, se detalla en cada escenario el efecto que tiene el sistema tras la desconexión de las líneas de transmisión, en el Anexo 3 se detalla cada uno de los tramos para cada escenario.

5.1.1. ESCENARIO 1: L/T ADELCA – EL OBRAJE

Para el Escenario 1 se presenta el análisis de la línea de transmisión que une las subestaciones Adelca y El Obraje, la línea se encuentra ubicada al sur del DMQ, con cercanía al inicio de la vía Alóag – Santo domingo, tiene una longitud de 4.3 km y se encuentra en una zona dónde los tramos de la infraestructura pasan por zonas que tienen alto índice de ocurrencia de un incendio. A continuación, en la Tabla 5.1 se presenta el cálculo de la probabilidad de falla de la L/T.

Tabla 5.1 Probabilidad de falla de la L/T Adelca – El obraje

Zonas	Combustible	Tramos	Prd	S [grados]	M _s [%]	F _D [cm]	V _w [km/h]	h [m]	L _f [m]	l(P)	Prob. falla [%]	Estado	
1	Hierva Corta	T1-T2	1	-0.400	8	0.55	11	16.5	0.7	-	0.682	34	No falla
			2	-0.400	8	0.55	11.2	16.5	0.75	-	0.603	35	No falla
	Chaparral	T2-T3	1	3.669	15	1.3	11	16.5	3.5	4.096	98	Falla	
			2	3.669	15	1.3	11.2	16.5	3.75	4.521	99	Falla	
		T3-T4	1	3.996	15	1.3	11	16.5	3.5	4.059	98	Falla	
			2	3.996	15	1.3	11.2	16.5	3.75	4.485	99	Falla	
2	Chaparral	T4-T5	1	7.022	15	1.3	11	16.5	3.5	3.726	98	Falla	
			2	7.022	15	1.3	11.2	16.5	3.75	4.151	98	Falla	
		T5-T6	1	3.996	15	1.3	11	16.5	3.5	4.059	98	Falla	
			2	3.996	15	1.3	11.2	16.5	3.75	4.485	99	Falla	

* Prd: Es el periodo en Horas

• **Disponibilidad de L/T Adelca – El Obraje**

Calculada la probabilidad de falla se puede determinar que la L/T supera el umbral de 50%, se desconecta y sale de servicio, es decir que no está disponible mientras dura el incendio evaluado en un periodo de 2 horas debido a que se evidencia un 99% de probabilidad de falla en el tramo T3 A T7. En la Figura 5.1 se puede apreciar la disponibilidad de la L/T evaluada.

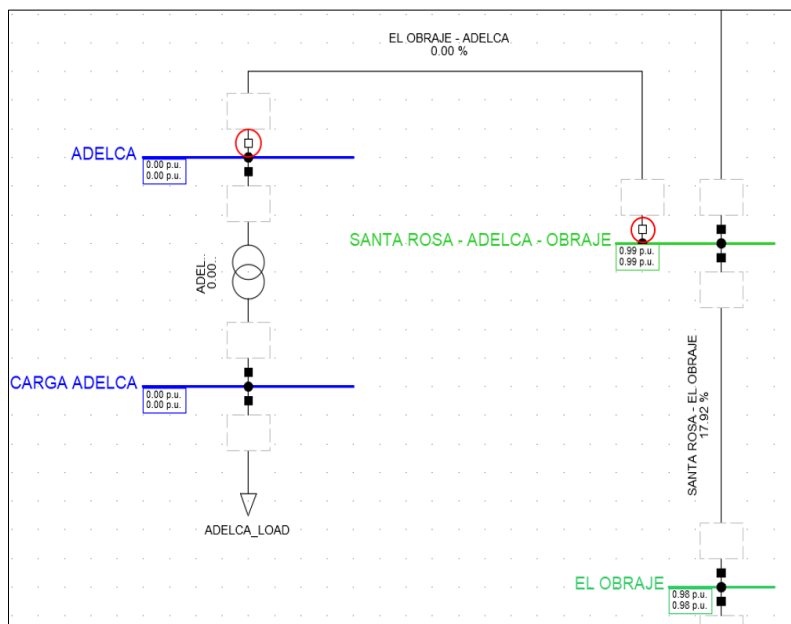


Figura 5.1 Disponibilidad de L/T Adelca-El Obraje

5.1.2. ESCENARIO 2: L/T SANTA ROSA – EL OBRAJE

En el escenario 2, se analiza la L/T que conecta las subestaciones Santa Rosa y El Obraje. Esta línea sigue la misma ruta que la derivación de Adelca, y tiene una longitud de 15.79 km, motivo por el cual aumenta los tramos y la infraestructura pasa por zonas que tienden a sufrir un impacto más elevado de incendios forestales. La Tabla 5.2 presenta el cálculo de la probabilidad de falla de la línea de transmisión.

Tabla 5.2 Probabilidad de falla de la L/T Santa Rosa – El Obraje

Zona	Combustible	Tramos	Prd	S [grds]	M_s [%]	F_D [cm]	V_w [km/h]	h [m]	L_f [m]	$l(P)$	Prob. falla [%]	Estado
1	Hierva Corta	T14-T15	1	0.166	8	0.55	10	16.5	0.65	-0.790	31	No falla
			2	0.166	8	0.55	10.3	16.5	0.7	-0.716	33	No falla
		T15-T16	1	0.099	8	0.55	10	16.5	0.65	-0.783	31	No falla
			2	0.099	8	0.55	10.3	16.5	0.7	-0.708	33	No falla
2	Chaparral	T16-T17	1	0.090	15	1.3	10	16.5	3	3.664	98	Falla
			2	0.090	15	1.3	10.3	16.5	3.2	3.998	98	Falla
		T17-T18	1	0.272	15	1.3	10	16.5	3	3.644	97	Falla
			2	0.272	15	1.3	10.3	16.5	3.2	3.978	98	Falla
		T18-T19	1	0.090	15	1.3	10	16.5	3	3.664	98	Falla
			2	0.090	15	1.3	10.3	16.5	3.2	3.998	98	Falla
		T19-T20	1	0.157	15	1.3	10	16.5	3	3.656	97	Falla
			2	0.157	15	1.3	10.3	16.5	3.2	3.991	98	Falla

* Prd: Es el periodo en Horas

- **Disponibilidad LT Santa Rosa – El Obraje**

Calculada la probabilidad de falla se puede determinar que la L/T tiende a presentar una probabilidad de falla más elevada debido a que se evidencia más del 95% de probabilidad de falla en los tramos T16 a T28. En la Figura 5.2 se puede apreciar la disponibilidad de la L/T.

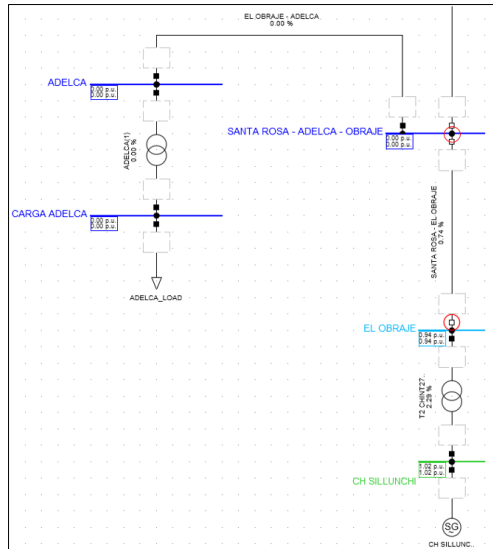


Figura 5.2 Disponibilidad de L/T Santa Rosa-El Obraje

5.1.3. ESCENARIO 3: DESCONEXIÓN L/T PAPALLACTA – PAPALLACTA MÓVIL

El escenario 3 plantea el análisis en la línea de transmisión Papallacta – Papallacta móvil, esta línea está ubicada en la periferia del DMQ, cuenta con una longitud de 15.5 km, 2 de sus tramos tienden a presentar probabilidad de falla por un incendio forestal debido a la zona por dónde cruza la estructura. El análisis de la probabilidad se presenta en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Probabilidad de falla de la L/T Santa Rosa – El obraje

Zona	Combustible	Tramos	Prd	S [grados]	M_s [%]	F_D [cm]	V_w [km/h]	h [m]	L_f [m]	$l(P)$	Prob. falla [%]	Estado
1	Matorral	T1-T2	1	-0.333	7	0.4	7	11	0.8	0.075	52	Falla
			2	-0.333	7	0.4	6.5	11	0.75	0.082	52	Falla
		T2-T3	1	-1	7	0.4	7	11	0.8	-0.181	45	No Falla
			2	-1	7	0.4	6.5	11	0.75	-0.138	47	No Falla
2	Chaparral	T3-T4	1	1.996	15	1.3	7	11	2.5	3.286	96	Falla
			2	1.996	15	13	6.5	11	2.3	1.523	82	Falla

* Prd: Es el periodo en Horas

- **Disponibilidad LT Papallacta – Papallacta Móvil**

Una vez calculada la probabilidad de falla, se determina que la línea de transmisión no tiende a superar tanto el umbral del 50%. Pero en uno de los tramos existe una probabilidad de 96% y como resultado, se desconecta la L/T. La Figura 5.3 muestra la disponibilidad de la línea de transmisión que conecta las subestaciones Santa Rosa – El Obraje.

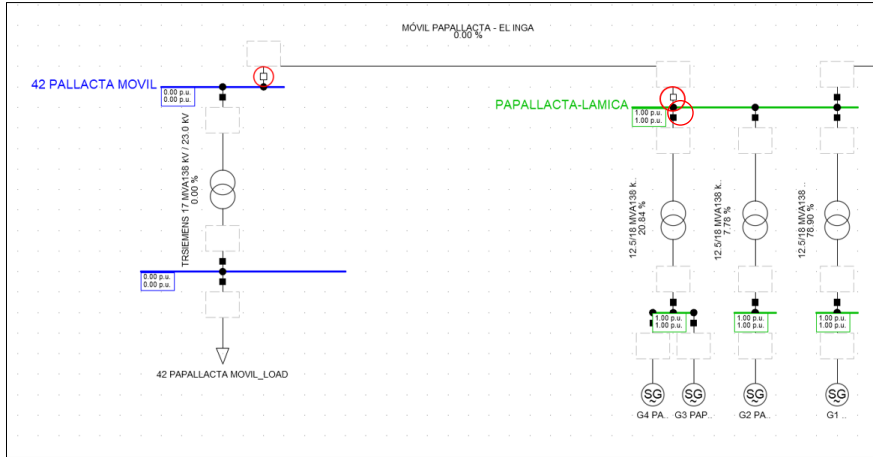


Figura 5.3 Disponibilidad de L/T Papallacta-Papallacta Móvil

5.1.4. ESENAIO 4: DESCONEXIÓN L/T MIRADOR ALTO – CONOCOTO / MIRADOR ALTO – SANTA ROSA

El escenario 4 plantea el análisis en 2 línea de transmisión que llegan a la subestación Mirador Alto, L/t Mirador Alto – Conocoto / Mirador Alto – Santa Rosa, estas líneas están ubicadas en la parte sur del DMQ y cuentan con una longitud de 12.5 y 5.8 km respectivamente, las líneas tienen una zona en común dónde sus tramos cruzan por un relieve con alta vegetación y alto índice de incendios. El análisis de la probabilidad de falla de ambas líneas se presenta en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15 Probabilidad de falla de la L/T Mirador Alto-Conocoto / Mirador Alto-Santa Rosa

Zonas	Combus.	Tramos	Prd	S [grados]	M_s [%]	F_D [cm]	V_w [km/h]	h [m]	L_f [m]	$l(P)$	Prob falla [%]	Estado
3	Chaparral	T3-T4	1	0.667	15	1.3	9	16.5	3	3.70	98	Falla
			7	0.667	15	1.3	9.21	16.5	3.5	4.49	99	Falla
		T4-T5	1	0.333	15	1.3	9	16.5	3	3.70	98	Falla
			7	0.333	15	1.3	9.21	16.5	3.5	4.56	99	Falla
		T5-T6	1	0.332	15	1.3	9	16.5	3	3.70	98	Falla
			7	0.332	15	1.3	9.21	16.5	3.5	4.56	99	Falla
		T6-T7	1	0.500	15	1.3	9	16.5	3	3.70	98	Falla
			7	0.500	15	1.3	9.21	16.5	3.5	4.63	99	Falla
		T15-T16	1	0	8	0.55	9	16.5	0.75	-0.55	36	No falla
			2	0	8	0.55	9.21	16.5	0.8	-0.48	38	No falla
		T16-T17	1	0.74977498	8	0.55	9	16.5	0.75	-0.55	36	No falla
			2	0.74977498	8	0.55	9.21	16.5	0.8	-0.48	38	No falla

L/T MIRADOR ALTO-SANTA ROSA												
2	Chaparral	T2-T3	1	0.250225	15	1.3	9	16.5	3	3.70	98	Falla
			7	0.250225	15	1.3	9.21	16.5	3.5	4.56	99	Falla
		T3-T4	1	0.666667	15	1.3	9	16.5	3	3.70	98	Falla
			7	0.666667	15	1.3	9.21	16.5	3.5	4.56	99	Falla

- **Disponibilidad L/T Mirador Alto – Conocoto / Mirador Alto – Santa Rosa**

Una vez calculada la probabilidad de falla, se determina que las 2 líneas de transmisión en esa zona presentan una alta probabilidad de falla de 99%, y por tanto salen de servicio. La Figura 5.4 muestra la desconexión de ambas líneas de transmisión.

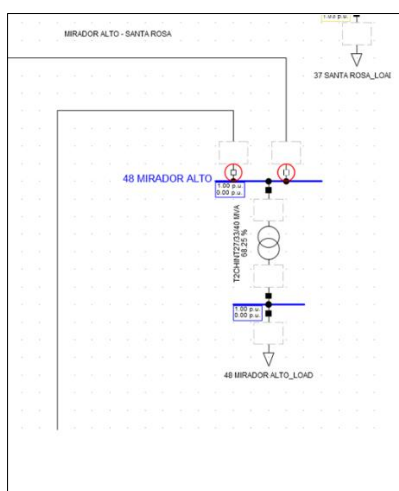


Figura 5.4 Disponibilidad de L/t Mirador Alto – Conocoto / Mirador Alto – Santa Rosa

5.2. RESULTADOS DE LAS MÉTRICAS DE RESILIENCIA

En este apartado se analiza la respuesta del sistema eléctrico basándose en los resultados de la energía no suministrada obtenidos a partir del modelo de optimización para cada escenario. La Figura 5.5 muestra el escenario más crítico, donde un incendio forestal provoca la desconexión de las líneas de transmisión Mirador Alto – Conocoto y Mirador Alto – Santa Rosa, lo que resulta en un deslastre de carga durante 7 horas. Durante este periodo, la desconexión de las líneas impide el suministro del 100% de la energía eléctrica a la barra de carga de Mirador Alto, lo que incrementa significativamente la ENS. La gráfica refleja la contingencia y el suministro de energía durante dicho evento. Además, se evidencia la efectividad de la estrategia de mejora mediante la reducción de la métrica Extensive (E), que mide la duración de la falla en horas. La aplicación de esta estrategia reduce el tiempo de interrupción del servicio, disminuyendo así la ENS total del sistema y demostrando una mejora en la resiliencia del sistema de transmisión frente a incendios forestales.

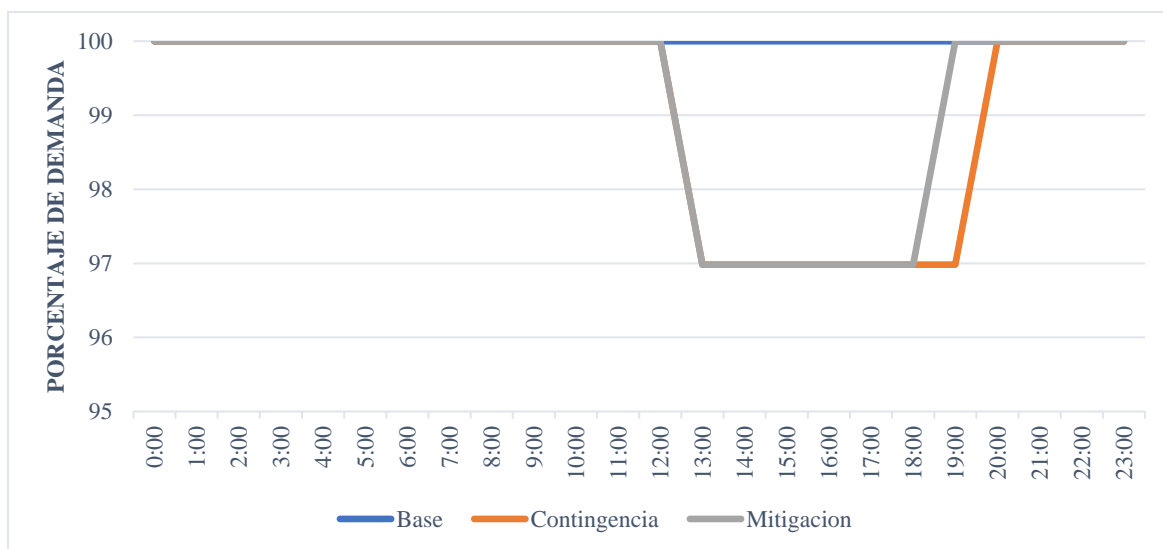


Figura 5.5 Deslaste de carga por salida de L/T

A continuación se presenta un resumen de los resultados de las métricas de la curva de resiliencia, obtenidos para cada escenario evaluado. La Tabla 5.4 detalla estos resultados, reflejando tanto el impacto de las contingencias como la efectividad de las estrategias de mitigación implementadas. Es importante destacar que las métricas en las que se realiza un mayor enfoque son la ENS que se obtiene del modelo de optimización, y especialmente la métrica E que es la que va a evidenciar la estrategia de mejora, en cada escenario evaluado las estrategias permiten reducir el tiempo de corte de suministro eléctrico en el periodo de 1 hora, lo que significa que se logra mejorar la respuesta del sistema eléctrico, ya que mientras menor sea el tiempo de desconexión de las líneas menor es la ENS del sistema y proporcionalmente reducirán los costos operativos demostrando así el fortalecimiento de la resiliencia del sistema de transmisión frente a incendios forestales.

Tabla 5.4 Resultados de la comparación entre las métricas de resiliencia para cada escenario.

L/T	Voltaje [kV]	Estrategia de mejora	Métricas de Resiliencia						
			EIU [%]	ENS [MW]	CENS [\$]	F [MW/h]	L [MW]	E [h]	P [MW/h]
Adelca-Obraje	138	No Aplicada	0.519	93.499	143989	-26.969	31.739	3	9.009
		Aplicada	0.350	63.101	97176	-26.969	31.739	2	9.009
Conocoto-M.alto/M.Alto-Santa Rosa		No Aplicada	0.987	178.000	274119	-18.434	27.200	7	3.772
		Aplicada	0,837	150.920	232416	-18.434	27.200	6	3.772
Santa Rosa-Obraje		No Aplicada	0.350	62.863	96808	-30.529	31.559	2	36.329
		Aplicada	0.174	31.302	48206	-30.529	31.302	1	36.329
Papallacta Papallacta Móvil		No Aplicada	0.085	15.285	23539	-0.773	5.125	3	20.516
		Aplicada	0.057	10.220	15740	-0.773	5.125	2	20.516

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al evaluar la resiliencia del sistema de transmisión eléctrico de Ecuador ante incendios forestales, se han identificado varios factores clave que requieren una atención particular. En este contexto, es esencial destacar la importancia de implementar estrategias de mitigación efectivas para reducir la vulnerabilidad del sistema frente a estos eventos. Las distintas métricas de resiliencia evaluadas se han revelado como indicadores fundamentales para cuantificar la respuesta del sistema eléctrico tras la salida de líneas afectadas por incendios. La implementación de planes de mitigación efectivos, son cruciales para mejorar la resiliencia del sistema de transmisión. En la Sección 6.1 se presentan las conclusiones de este estudio, y en la Sección 6.2 se detallan las recomendaciones.

6.1. CONCLUSIONES

Este trabajo ha propuesto un marco metodológico para la evaluación y fortalecimiento de la resiliencia del sistema de transmisión en Ecuador frente a incendios forestales. A través de esta metodología, se ha logrado caracterizar de manera detallada los incendios forestales, evaluar su impacto en los componentes de las redes eléctricas, analizar la respuesta del sistema, e identificar estrategias de mejora para mitigar dicho. Las estrategias de mitigación propuestas en esta investigación permiten reducir los tiempos de desconexión de las líneas de transmisión y, al mismo tiempo, disminuir la métrica ENS (Energía No Suministrada), que es fundamental para este estudio. Esto, a su vez, mejora la resiliencia del sistema y garantiza un suministro de energía confiable, asegurando que se pueda satisfacer la demanda de manera adecuada en situaciones de emergencia.

El uso del modelo de optimización OPF-DC con pérdidas, implementado en AMPL, ha permitido evaluar la respuesta del sistema con precisión, utilizando métricas de resiliencia como la ENS, EIU y las métricas FLEP derivadas de la curva conceptual del trapecioide de resiliencia. El estudio realizado en la red de la Empresa Eléctrica Quito, mediante la metodología aplicada para analizar el impacto de incendios forestales en conductores de líneas aéreas, permitió identificar áreas críticas donde la ocurrencia de incendios podría causar interrupciones significativas en el suministro eléctrico. Al realizar el cálculo de la probabilidad de falla las líneas de transmisión de 138 kV demostraron ser particularmente vulnerables debido a su proximidad a zonas con alta probabilidad de incendios.

Los resultados obtenidos subrayan la importancia de implementar estrategias de mitigación efectivas para disminuir tanto el tiempo como el impacto de los incendios forestales, y fortalecer así la capacidad de respuesta del sistema de transmisión. Inicialmente, la desconexión de las líneas duraba un periodo determinado; sin embargo, al calcular la probabilidad de falla para cada uno de los escenarios propuestos en el caso de estudio, se evidenció que la aplicación de estrategias de mitigación reduce significativamente la métrica E (Extensive) durante el periodo crítico de 1 hora, tiempo en el cual la línea de transmisión permanece fuera de servicio. En este contexto, reducir el tiempo de interrupción mejora la resiliencia del sistema, ya que cuanto menor sea la duración de la falla, menor será la ENS y, en consecuencia, se garantiza un mejor suministro de energía del sistema.

A partir de los resultados obtenidos a partir del caso de estudio se puede determinar que en el escenario Adelca-Obraje se reduce el tiempo de desconexión de la línea de 3 a 2 horas y la ENS pasa de 93.499 a 63.101 MW. Para el escenario Conocoto-M.alto/M.Alto-Santa Rosa la desconexión inicialmente era 7 horas y pasa a 6 horas, de la misma forma la ENS de 178.000 MW ahora es 150.92 MW. Por otro lado, en el escenario Santa Rosa-Obraje el tiempo de desconexión de 2 horas se reduce a 1 hora, y la ENS pasa de 62.863 a 31.302 MW. Finalmente para el escenario Papallacta-Papallacta Móvil la estrategia permite acortar la desconexión de 3 a 2 horas, mientras que la ENS inicialmente era 15.285 ahora es de 10.220 MW. Estos resultados evidencian que las estrategias de mitigación no solo reducen el tiempo de desconexión, sino que también logran una reducción sustancial en la Energía No Suministrada, lo que contribuye significativamente a la mejora de la resiliencia del sistema de transmisión frente a incendios forestales.

6.2. RECOMENDACIONES

Las estrategias para mitigar el impacto de los incendios forestales en las líneas de transmisión se centran en la prevención de fallas e igniciones, esto forma una parte muy importante para reducir los riesgos y mejorar la resiliencia. Entre las medidas más efectivas se encuentra el refuerzo estructural, la gestión e inspección de activos, la implementación de sistemas de protección y la gestión de vegetación, para esta última medida se plantea el uso de tecnología avanzada, como drones, en la cual se destaca como una estrategia emergente que puede acelerar la respuesta ante estos eventos, reduciendo así significativamente los tiempos e falla, se recomienda revisar planes de mitigación basados en la adaptación de nueva tecnología

como el uso de drones e imágenes aéreas para poder tener una detección temprana de eventos de incendios forestales es beneficioso para poder tener una respuesta rápida ante estos posibles riesgos, con esto se logra obtener una reducción en el tiempo de falla y mejorar la resiliencia del sistema.

Dado que en muchos casos las líneas de transmisión se encuentran en sectores vulnerables a incendios forestales, se recomienda reforzar la infraestructura en estas áreas. Implementando sistemas de protección que minimicen los tiempos y el impacto a las líneas aéreas, garantizando así una mejor confiabilidad en el suministro.

Es importante el desarrollo y la actualización de planes que mejoren la resiliencia, basados en estrategias específicas de mitigación ante incendios forestales. El objetivo de los planes es la reducción de los tiempos de desconexión, lo que contribuirá a mejorar la seguridad, confiabilidad y sostenibilidad del sistema de transmisión, garantizando un suministro continuo y estable.

Para investigaciones centradas en eventos naturales impredecibles que afectan sistemas eléctricos, como los incendios forestales, es crucial realizar primero una investigación exhaustiva y detallada de las características del sistema eléctrico. Además es especialmente importante enfocarse en los parámetros relacionados con los incendios forestales, ya que la metodología propuesta en este trabajo debe adaptarse a las particularidades de la zona de estudio. Esto implica utilizar fuentes de datos diversificadas, consultar con expertos, y emplear herramientas de simulación avanzadas para suplir la falta de información específica. El objetivo es obtener un entendimiento profundo y contextualizado que permita desarrollar estrategias efectivas de resiliencia para el sistema de transmisión.

Es fundamental utilizar un perfil de demanda horaria en investigaciones relacionadas con la resiliencia del sistema de transmisión ante incendios forestales. Esto permite correlacionar de manera precisa los registros de inicio y fin de los incendios con los patrones de consumo eléctrico, lo que facilita una evaluación más detallada del impacto real en la red. Al integrar esta información en los modelos de análisis, se puede mejorar la precisión de las simulaciones y desarrollar estrategias de mitigación más efectivas, que consideren no solo la duración de las interrupciones, sino también las variaciones en la demanda a lo largo del día, optimizando así la respuesta del sistema en escenarios críticos.

7. REFERENCIAS

- [1] J. F. Culqui Tipán, «Mejora de la resiliencia operativa de un sistema de distribución eléctrico ante una erupción volcánica mediante la gestión de la demanda eléctrica.», nov. 2022, Accedido: 21 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/9555>
- [2] R. E. Robles Vázquez, «Proyecto para solucionar los disparos recurrentes de la línea de transmisión de 115KV por quema de caña en San Antonio el Paraje. municipio de San Cristobal de las Casas, Chiapas.», Thesis, 2011. Accedido: 21 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.digital.tuxtla.tecnm.mx/xmlui/handle/123456789/364>
- [3] «SITREP-No-07-Incendios-Forestales-01012022-a-03102022rv.pdf». Accedido: 20 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2022/10/SITREP-No-07-Incendios-Forestales-01012022-a-03102022rv.pdf>
- [4] A. Villamarín, R. Haro, M. Aguirre, y D. Ortiz, «Evaluación de Resiliencia en el Sistema Eléctrico Ecuatoriano frente a Eventos Sísmicos», *Rev. Téc. Energ.*, vol. 17, n.º 2, pp. 18-28, jun. 2021, doi: 10.37116/revistaenergia.v17.n2.2021.440.
- [5] «Maintaining Electric System Safety Through An Enhanced Network Resilience | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore». Accedido: 21 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8340846>
- [6] «Power System Resilience to Extreme Weather: Fragility Modeling, Probabilistic Impact Assessment, and Adaptation Measures | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore». Accedido: 21 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7801854>
- [7] «Quantitative Resilience Assessment for Power Transmission Systems Under Typhoon Weather | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore». Accedido: 21 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8418359>
- [8] «Electrical Power System Resilience Assessment: A Comprehensive Approach | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore». Accedido: 21 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8827570>

- [9] «A Planning-Oriented Resilience Assessment Framework for Transmission Systems Under Typhoon Disasters | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore». Accedido: 21 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9144251>
- [10] I. Dobson, B. A. Carreras, V. E. Lynch, y D. E. Newman, «Complex systems analysis of series of blackouts: cascading failure, critical points, and self-organization», *Chaos Woodbury N*, vol. 17, n.º 2, p. 026103, jun. 2007, doi: 10.1063/1.2737822.
- [11] «Vulnerability assessment of the power grid against progressing wildfires - ScienceDirect». Accedido: 13 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0379711215000168>
- [12] H. R. Sayarshad y R. Ghorbanloo, «Evaluating the resilience of electrical power line outages caused by wildfires», *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 240, p. 109588, dic. 2023, doi: 10.1016/j.res.2023.109588.
- [13] T. Tapia Sandoval, «Robust optimization for wildfire response analysis in highly renewable power systems», oct. 2022. doi: 10.7764/tesisUC/ING/65023.
- [14] D. N. Trakas y N. D. Hatziargyriou, «Optimal Distribution System Operation for Enhancing Resilience Against Wildfires», *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, n.º 2, pp. 2260-2271, mar. 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2733224.
- [15] «resilience-us-electricity-system-multi-hazard-perspective.pdf». Accedido: 13 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.energy.gov/policy/articles/resilience-us-electricity-system-multi-hazard-perspective>
- [16] «CONICET_Digital_Nro.9b7279fe-698b-409e-aaf8-513f53c28b35_A.pdf». Accedido: 13 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/143568/CONICET_Digital_Nro.9b7279fe-698b-409e-aaf8-513f53c28b35_A.pdf?sequence=2
- [17] J. Pilatásig y D. Carrión, «Electrical Power Systems Resilience by Switching of Power Transmission Lines -State of art», *ID Tecnológico*, vol. 16, ago. 2020.
- [18] E. Vugrin, A. Castillo, y C. Silva-Monroy, «Resilience Metrics for the Electric Power System: A Performance-Based Approach.», SAND2017-1493, 1367499, 654236, feb. 2017. doi: 10.2172/1367499.
- [19] X. Ubeda y M. Francos, «INCENDIOS FORESTALES. UN FENÓMENO GLOBAL», p. 1253, nov. 2018.

- [20] M. Castillo, P. Pedernera, y E. Peña, «Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global», 2003.
- [21] «Incendios y deforestación: Las ocho normas que avivan el fuego en Bolivia», INESAD. Accedido: 13 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.inesad.edu.bo/2020/08/24/incendios-y-deforestacion-las-ocho-normas-que-avivan-el-fuego-en-bolivia/>
- [22] «Incendios forestales afectan tendido eléctrico de ANDE en Alto Paraguay - Noticias del Chaco - ABC Color». Accedido: 21 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.abc.com.py/nacionales/chaco/2024/08/16/incendios-forestales-afectan-tendido-electrico-de-ande-en-alto-paraguay/>
- [23] «¿Cuáles son las variables y qué factores las afectan? | Argentina.gob.ar». Accedido: 21 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/fuego/conocemas/variables>
- [24] «04CAPITULO2.pdf». Accedido: 21 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6436/04CAPITULO2.PDF>
- [25] «Incendios forestales y su relación con la meteorología | Blog Meteoclim». Accedido: 18 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://blog.meteoclim.com/incendios-forestales-y-su-relacion-con-la-meteorologia>
- [26] M. Nazemi, P. Dehghanian, Y. Darestani, y J. Su, «Parameterized Wildfire Fragility Functions for Overhead Power Line Conductors», *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 39, n.º 2, pp. 2517-2527, mar. 2024, doi: 10.1109/TPWRS.2023.3298769.
- [27] G. Gerbi, «Riesgo eléctrico en el manejo del fuego bajo líneas eléctricas».
- [28] A. P. Rodríguez y D. C. Gil, «Impactos de tendidos eléctricos de alta tensión: análisis, evaluación y restauración».
- [29] M. Choobineh, B. Ansari, y S. Mohagheghi, «Vulnerability assessment of the power grid against progressing wildfires», *Fire Saf. J.*, vol. 73, pp. 20-28, abr. 2015, doi: 10.1016/j.firesaf.2015.02.006.
- [30] J. W. Muhs, M. Parvania, y M. Shahidehpour, «Wildfire Risk Mitigation: A Paradigm Shift in Power Systems Planning and Operation», *IEEE Open Access J. Power Energy*, vol. 7, pp. 366-375, 2020, doi: 10.1109/OAJPE.2020.3030023.
- [31] M. Bidegaray, «La red eléctrica sigue vulnerable a otro incendio que puede dejar medio país sin luz», Clarín. Accedido: 13 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en:

https://www.clarin.com/economia/red-electrica-sigue-vulnerable-incendio-puede-dejar-medio-pais-luz_0_kseLzBWWu3.html

- [32] «EEFF_Auditados_2020.pdf». Accedido: 13 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.distriluz.com.pe/transp/ftp/elcto/transp3/EEFF_Auditados_2020.pdf
- [33] K. Saldaña, «Incendios forestales afectan línea de transmisión eléctrica en Panamá», Tvn Panamá. Accedido: 13 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.tvn-2.com/economia/economia-panamena/incendios-forestales-transmision-electrica-panama-video_1_1292331.html
- [34] E. Telégrafo, «Incendio forestal deja tres cantones sin electricidad», El Telégrafo. Accedido: 13 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/judicial/12/incendio-forestal-deja-tres-cantones-sin-electricidad>
- [35] «incendio california y australia.pdf».
- [36] E. Pastor, L. Zárate, E. Planas, y J. Arnaldos, «Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour», *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 29, n.º 2, pp. 139-153, ene. 2003, doi: 10.1016/S0360-1285(03)00017-0.
- [37] «Calculations on forest fire spread by flame radiation | Fire Research and Management Exchange System». Accedido: 13 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.frames.gov/catalog/38414>
- [38] H. E. Anderson, I. C. Santos, Z. L. Hildenbrand, y K. A. Schug, «A review of the analytical methods used for beer ingredient and finished product analysis and quality control», *Anal. Chim. Acta*, vol. 1085, pp. 1-20, nov. 2019, doi: 10.1016/j.aca.2019.07.061.
- [39] R. O. Weber, «Analytical Models for Fire Spread Due to Radiation».
- [40] J. L. Rossi, «An analytical model based on radiative heating for the determination of safety distances for wildland fires», *Fire Saf. J.*, 2011.
- [41] W. W. Hargrove, R. H. Gardner, M. G. Turner, W. H. Romme, y D. G. Despain, «Simulating fire patterns in heterogeneous landscapes», *Ecol. Model.*, 2000.
- [42] M. Choobineh, B. Ansari, y S. Mohagheghi, «Vulnerability assessment of the power grid against progressing wildfires», *Fire Saf. J.*, vol. 73, pp. 20-28, abr. 2015, doi: 10.1016/j.firesaf.2015.02.006.
- [43] P. X. Pérez Montalvo, «Determinación de sobrevoltajes en el aislamiento de torres de transmisión considerando la variación aleatoria simultánea de los parámetros de las

- descargas atmosféricas.», bachelorThesis, Quito, 2017., 2017. Accedido: 21 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18824>
- [44] «04CAPITULO2.pdf».
- [45] L. Zárate López, J. Arnaldos Viger, y J. Casal Fàbrega, «Establishing safety distances for wildland fires», *Fire Saf. J.*, vol. 43, n.º 8, pp. 565-575, nov. 2008, doi: 10.1016/j.firesaf.2008.01.001.
- [46] G. Mihai, A.-M. Alexandru, I.-A. Nita, y M.-V. Birsan, «Climate Change in the Provenance Regions of Romania over the Last 70 Years: Implications for Forest Management», *Forests*, vol. 13, n.º 8, Art. n.º 8, ago. 2022, doi: 10.3390/f13081203.
- [47] P. Cisneros y M. Ilbay-Yupa, «How is climate change adaptation aid allocated? A study of climate justice in Ecuador», *Rev. Desarro. Soc.*, n.º 95, Art. n.º 95, oct. 2023, doi: 10.13043/DYS.95.3.
- [48] J. Quinteros Flores, D. Carrión, y P. Masache, «Revisión para la restauración óptima de la operación del sistema eléctrico basado en criterios de calidad de energía y estabilidad», *ID Tecnológico*, vol. 17, feb. 2021, doi: 10.33412/idt.v17.1.2928.

