



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

**TEMA: ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS ESQUEMAS DEL  
SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LA LÍNEA DE  
SUBTRANSMISIÓN A 69 KV SAN RAFAEL-MULALO PARA LA  
REDUCCIÓN DE LOS INDICADORES DE CALIDAD TÉCNICA  
DE SERVICIO ELÉCTRICO FRECUENCIA MEDIA (FMIK) Y  
TIEMPO PROMEDIO (TTIK) DE INTERRUPCIÓN DE LA  
EMPRESA ELÉCTRICA COTOPAXI ELEPCO S.A.**

**AUTOR:**

**JAVIER ANDRES VIQUE QUINDE**

**DIRECTOR: ING. HERNÁN ITURRALDE**

**LATACUNGA**

**2017**



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA DE INGENIERIA ELECTROMECAÁNICA**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo titulado “ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS ESQUEMAS DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LA LÍNEA DE SUBTRANSMISIÓN A 69 KV SAN RAFAEL-MULALO PARA LA REDUCCIÓN DE LOS INDICADORES DE CALIDAD TÉCNICA DE SERVICIO ELÉCTRICO FRECUENCIA MEDIA (FMIK) Y TIEMPO PROMEDIO (TTIK) DE INTERRUPCIÓN DE LA EMPRESA ELÉCTRICA COTOPAXI ELEPCO S.A.” realizado por Javier Andrés Vique Quinde, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor Javier Andrés Vique Quinde para que lo sustente públicamente.

Latacunga, noviembre del 2017

Ing. Hernán Iturralde  
DIRECTOR



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, Javier Andrés Vique Quinde, con cedula de ciudadanía 172034818-2, declaro que este trabajo de titulación **“ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS ESQUEMAS DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LA LÍNEA DE SUBTRANSMISIÓN A 69 KV SAN RAFAEL-MULALO PARA LA REDUCCIÓN DE LOS INDICADORES DE CALIDAD TÉCNICA DE SERVICIO ELÉCTRICO FRECUENCIA MEDIA (FMIK) Y TIEMPO PROMEDIO (TTIK) DE INTERRUPCIÓN DE LA EMPRESA ELÉCTRICA COTOPAXI ELEPCO S.A.”**, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Latacunga, noviembre del 2017.

Javier Andrés Vique Quinde

C.C.: 172034818-2



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA**

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Yo, Javier Andrés Vique Quinde, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en el repositorio institucional el trabajo de titulación **“ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS ESQUEMAS DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LA LÍNEA DE SUBTRANSMISIÓN A 69 KV SAN RAFAEL-MULALO PARA LA REDUCCIÓN DE LOS INDICADORES DE CALIDAD TÉCNICA DE SERVICIO ELÉCTRICO FRECUENCIA MEDIA (FMIK) Y TIEMPO PROMEDIO (TTIK) DE INTERRUPCIÓN DE LA EMPRESA ELÉCTRICA COTOPAXI ELEPCO S.A.”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Latacunga, noviembre del 2017.

Javier Andrés Vique Quinde

C.C.: 172034818-2

## **DEDICATORIA**

A Dios ya que por él y para él son todas las cosas, a mis hermanos quienes siempre han estado pendientes de mi desarrollo, a mis tíos quienes con su ánimo he podido continuar, a mi padre quien con su ejemplo me enseñó siempre a trabajar por lo que quiero, a las pequeñas que este sea un punto de referencia para que lleguen mucho más lejos de lo que yo lo hare, a mi viejita a quien le debo todo por su paciencia, esfuerzo y dedicación puedo decirle con mucho orgullo “lo logré, pero no fue solo”.

## **AGRADECIMIENTO**

Primero a Dios por la salud, la vida y sobre todo la oportunidad de tener a mi familia, amigos, profesores, profesionales y compañeros en este momento tan especial para mí.

A mis padres por haberme dado el privilegio de ser parte de sus vidas y por darme la bendición de tener a mis hermanos junto a mí, a mis hermanos por siempre cuidar de mí, a mis tíos y las pequeñas por su gran esfuerzo.

A ELEPCO S.A. por permitirme realizar mi estudio, otorgándome no solo un espacio en la empresa sino también por el tiempo que me han brindado los profesionales de la institución.

A la universidad en especial a la carrera de ingeniería electromecánica las cuales me han dado mucho, gracias por permitirme formarme como profesional y como persona.

Gracias por ser parte de mi vida y por permitirme ser parte de las suyas.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA .....	i
CERTIFICACIÓN .....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....	iii
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN.....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xii
RESUMEN .....	xiv
ABSTRACT.....	xv

### CAPÍTULO I

<b>1. PROBLEMÁTICA.....</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del Problema .....	1
1.2. Antecedentes.....	1
1.3. Justificación e importancia .....	2
1.4. Objetivos.....	2
1.4.1. Objetivo General .....	2
1.4.2. Objetivos Específicos.....	2

### CAPÍTULO II

<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>4</b>
2.1. Introducción .....	4
2.2. Fundamentación teórica.....	4
2.2.1. Sistemas Eléctricos de Potencia .....	4

2.2.2.	Componentes del Sistema Eléctrico de Potencia .....	4
a.	Subestación .....	4
b.	Transformadores de Potencia .....	5
c.	Líneas de Distribución.....	5
d.	Líneas de Subtransmisión.....	5
2.2.3.	Área de concesión de la Eléctrica ELEPCO S.A. ....	6
2.2.4.	Sobrevoltajes en las líneas de Transmisión .....	6
2.2.5.	Características de las descargas atmosféricas .....	7
2.2.6.	Características de los rayos .....	7
2.2.7.	Protecciones contra descargas atmosféricas .....	9
2.2.8.	Efectos de las descargas atmosféricas .....	10
2.2.9.	Modelamiento de líneas .....	11
2.2.10.	Indicadores de Calidad Técnica del Servicio Eléctrico .....	12
2.2.11.	Límites de los índices de calidad.....	13

### **CAPÍTULO III**

<b>3.</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>15</b>
3.1.	Antecedentes de investigación.....	15
3.2.	Fundamentación legal.....	16
3.3.	Hipótesis .....	16
3.4.	Variables de investigación.....	16
3.5.	Operacionalización de variables.....	17
3.6.	Modalidad de la investigación .....	18
3.6.1.	Investigación bibliográfica .....	18
3.6.2.	Investigación de campo .....	19
3.6.3.	Investigación experimental.....	19
3.7.	Población y muestra.....	19

3.8.	Técnicas de recolección de datos .....	20
3.8.1.	La observación en la simulación .....	20
3.8.2.	Instrumentos .....	20

## **CAPÍTULO IV**

<b>4.</b>	<b>RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>21</b>
4.1.	Análisis de los resultados .....	21
4.2.	Sistema eléctrico ELEPCO .....	21
4.2.1.	Características técnicas .....	22
4.3.	Probabilidad de Caída de Rayos en las Redes Aéreas .....	25
4.3.1.	Cálculo de Densidad de Descargas a Tierra .....	26
4.3.2.	Cálculo de la probabilidad de caída de rayos .....	27
4.3.3.	Cálculo del número de impactos por descargas directas .....	27
4.3.4.	Calculo del número de impactos por descargas inducidas .....	28
4.3.5.	Calculo del voltaje inducido por una descarga directa .....	30
4.4.	Línea de subtransmisión San Rafael-Mulalo .....	31
4.5.	Descripción de los esquemas de protección de la línea .....	32
4.6.	Desarrollo del modelamiento .....	33
4.6.1.	Descripción de las variables incluidas en el modelamiento .....	33
4.6.2.	Simulación mediante Simulink .....	36
4.6.3.	Aplicación de sobrevoltajes en puntos críticos .....	38
4.6.4.	Obtención de datos .....	39
4.7.	Discusión de los resultados .....	41
4.7.1.	Análisis de corrientes obtenidas .....	41
4.7.2.	Determinación de los puntos afectados .....	42
4.7.3.	Diagnóstico de la situación actual de las líneas .....	43
4.7.4.	Efectos de los sobre voltajes aplicados en diferentes puntos .....	46

4.7.5.	Observación del fenómeno .....	47
4.8.	Descripción de los resultados obtenidos .....	49
4.8.1.	Análisis de los índices de calidad del servicio eléctrico FMIK y TTIK.....	50
<b>CAPÍTULO V.....</b>		<b>52</b>
<b>5.</b>	<b>PROPUESTA.....</b>	<b>52</b>
5.1.	Datos informativos .....	52
5.2.	Antecedentes de la propuesta.....	52
5.3.	Justificación .....	53
5.4.	Objetivo.....	53
5.5.	Fundamentación propuesta.....	53
5.6.	Comprobación de hipótesis.....	56
<b>CONCLUSIONES.....</b>		<b>58</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>		<b>59</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>60</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>62</b>
<b>ANEXO 1: DIAGRAMA UNIFILAR DE ELEPCO S.A.</b>		
<b>ANEXO 2: DIAGRAMA UNIFILAR DE PROTECCIONES</b>		
<b>ANEXO 3: DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA SAN RAFAEL-MULALO</b>		
<b>ANEXO 4: REPORTE GENERADO DE LA SIMULACIÓN</b>		

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Líneas de subtransmisión de 69 KV.....	5
Tabla 2 Parámetros de distribución logarítmica normal para descargas ....	8
Tabla 3 Límites admisibles de los índices de calidad de servicio técnico.	14
Tabla 4 Índices de calidad de servicio de ELEPCO S.A. ....	14
Tabla 5 Operacionalización de variable dependiente.....	17
Tabla 6 Operacionalización de variable independiente.....	18
Tabla 7 Detalle de elementos de la subestación San Rafael .....	23
Tabla 8 Detalle de elementos de la subestación Mulalo .....	24
Tabla 9 Aislador Primario (CFO).....	28
Tabla 10 Características de protecciones.....	33
Tabla 11 Datos de puestas a tierra.....	46
Tabla 12 Coordinación de protecciones ELEPCO S.A.....	49
Tabla 13 Registro de reclamos por corte de energía .....	51

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Área de concesión de ELEPCO S.A. ....	6
Figura 2 Descripción de parámetros para la forma de onda de rayo.....	8
Figura 3 Tipos de rayos (nube-tierra).....	10
Figura 4 Mapa de las Áreas de Concesión de las Distribuidoras. ....	21
Figura 5 Subestación San Rafael .....	22
Figura 6 Subestación Mulalo .....	24
Figura 7 Mapa del Nivel Ceraúnico del Ecuador.....	26
Figura 8 Factores de apantallamiento debido a objetos cercanos, para una altura de la línea de distribución de 10m.....	27
Figura 9 Número de voltajes inducidos vs. Nivel de aislamiento de la línea .....	28
Figura 10 Diagrama Unifilar San Rafael-Mulalo .....	32
Figura 11 Interfaz de PowerLib.....	34
Figura 12 Modelación de línea de subtransmisión en Simulink.....	34
Figura 13 Descripción Parte 1 .....	35
Figura 14 Descripción Parte 2 .....	35
Figura 15 Descripción Parte 3 .....	36
Figura 16 Descripción Parte 4 .....	36
Figura 17 Ventana de configuración de parámetros .....	37
Figura 18 Datos de la línea de subtransmisión .....	37
Figura 19 Aplicación de sobrevoltajes en punto crítico 1 .....	38
Figura 20 Aplicación de sobrevoltajes punto crítico 2 .....	38
Figura 21 Pasos para generación de reporte.....	39
Figura 22 Datos para generación de reporte .....	40
Figura 23 Corriente de entrada a la línea de subtransmisión .....	41
Figura 24 Valor de la corriente de entrada.....	41
Figura 25 Corriente de salida de la línea de transmisión .....	42
Figura 26 Valor de la corriente de salida .....	42
Figura 27 Tensor suelto.....	43
Figura 28 Puesta a tierra obstruida.....	44
Figura 29 Medición de puesta a tierra.....	44
Figura 30 Aislador de suspensión roto.....	45

Figura 31 Voltaje de la línea de subtransmisión .....	47
Figura 32 Salida de Voltaje del primer punto .....	48
Figura 33 Salida de Voltaje del segundo punto.....	48
Figura 34 Curva de protecciones de la simulación.....	50
Figura 35 Modelación de línea de subtransmisión en Simulink.....	52
Figura 36 Voltaje de salida .....	54
Figura 37 Corriente de salida .....	54
Figura 38 Curva de protecciones de la simulación.....	55

## RESUMEN

Los sistemas eléctricos tienen la necesidad de proteger sus redes frente al crecimiento abrupto de la forma de onda de voltaje, originado por fenómenos tanto internos como externos, como es el caso del sistema de subtransmisión de la Empresa Eléctrica Cotopaxi (ELEPCO S.A.). Por esta razón en el presente proyecto se realizó un estudio de los esquemas de conexión de los sistemas de puesta a tierra en la línea de subtransmisión a 69 [kV] San Rafael–Mulalo mediante una investigación de campo se establece que posee un valor promedio de 75,89 [ $\Omega$ ], los mismos que se encuentran fuera de un rango normalizado el cual de acuerdo a la norma IEEE 80 es de 10 [ $\Omega$ ] para protección contra rayos, así como también, los índices de calidad FMIK y TTIK se encuentran en 7,3 y 5,2 respectivamente, lo que nos muestra que el sistema de puesta a tierra no está en óptimas condiciones de trabajo. De acuerdo a la simulación realizada, se ha determinado el comportamiento del sistema de puesta a tierra bajo las condiciones actuales, frente a una descarga atmosférica de 27,37 [kA], dando como resultado un tiempo de estabilización de 0,07 [seg]. Tomando en consideración con un sistema de puesta a tierra de 10 [ $\Omega$ ], el pico de corriente es 1,0448 [kA], se permite una disipación en 0,015 [seg] lo que permite definir que si existe una influencia en la estabilización del sistema. Con esta consideración se establece que se puede mejorar los índices de calidad FMIK y TTIK los cuales son regulados por el CONELEC. De acuerdo al análisis se establece, que para mejorar estos índices es necesario realizar ensayos complementarios como inspección visual, efecto corona y termografía a los aisladores para establecer si existe otras influencias.

### PALABRAS CLAVE:

- **SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA**
- **DESCARGADORES DE SOBREVOLTAJE**
- **CALIDAD DEL SERVICIO ELÉCTRICO**

## **ABSTRACT**

Electrical systems have the need to protect their networks against the abrupt growth of the voltage waveform, caused by both internal and external phenomena, such as the Cotopaxi Electric Company (ELEPCO S.A.) subtransmission system. For this reason in the present project a study of the connection schemes of the grounding systems in the line of subtransmission to 69 [kV] San Rafael-Mulalo through a field investigation is established that has a value Average of 75.89 [ $\Omega$ ], which are outside a standard range which according to the IEEE 80 standard is 10 [ $\Omega$ ] for lightning protection, as well as the quality indexes FMIK and TTIK Are in 7.3 and 5.2 respectively, which shows that the earthing system is not in optimal working conditions. According to the simulation carried out, the behavior of the earthing system under the current conditions was determined, compared to an atmospheric discharge of 27.37 [kA], resulting in a stabilization time of 0.07 [sec]. Taking into consideration a grounding system of 10 [ $\Omega$ ], the current peak is 1.0448 [kA], dissipation is allowed in 0.015 [sec], which allows to define that if there is an influence on the stabilization of the system. With this consideration it is established that the FMIK and TTIK quality indexes can be improved, which are regulated by CONELEC. According to the analysis it is established that to improve these indices it is necessary to carry out complementary tests such as visual inspection, crown effect and thermography to the insulators to establish if there are other influences.

### **KEYWORDS:**

- **GROUNDING SYSTEMS**
- **SURGE ARRESTERS**
- **QUALITY OF ELECTRIC SERVICE**

## **CAPÍTULO I**

### **1. PROBLEMÁTICA**

#### **1.1. Planteamiento del Problema**

La línea de subtransmisión San Rafael-Mulalo es una de la más expuestas a sufrir fallas por sobrevoltajes, muchos de ellos pueden darse por origen externo (descargas atmosféricas) si se toma en cuenta el nivel isoceraunico de la zona el cual es de 20 (Figura 7), pero por caso de estudio se tomará dicho valor más el 50%, según la norma de la IEEE Std 1410-2004, eso quiere decir que el nivel isoceraunico de la zona seria de 30; provocando de esta manera la apertura total de la red debido a la conexión de las protecciones; la selectividad de los sistemas de protección de la línea requiere un estudio para así garantizar la continuidad del servicio eléctrico

#### **1.2. Antecedentes**

Los sistemas eléctricos de potencia deben ser protegidos frente al crecimiento de la onda de voltaje originados, por lo que existen múltiples tecnologías para la protección frente a estos fenómenos; siendo la más utilizada la protección con el uso de Descargadores de Sobrevoltaje (Surge Arresters) y puesta a tierra, los cuales se han construido de diferentes materiales y característica de operación para los diferentes niveles de voltajes que se han desarrollado en los sistemas eléctricos.

Resulta de gran importancia para la empresa ELEPCO S.A. analizar la selectividad en las protecciones de la línea de subtransmisión San Rafael–Mulalo para garantizar que en caso de que se presenten estos sobrevoltajes en las zonas con mayor probabilidad de ocurrencia dependiendo del nivel isoceraunico, no provoquen la apertura de la línea desde la cabecera.

Cabe resaltar que una de las políticas de la empresa ELEPCO S.A. es brindar energía procurando la continuidad, confiabilidad y eficiencia del servicio, así como la optimización de los recursos disponibles; los factores determinantes a utilizar, y que brindarán una evaluación de la línea de transmisión son el número y el tiempo de interrupciones denotados como

FMIK (frecuencia media) y TTIK (Tiempo promedio) de acuerdo a la Regulación del ARCONEL 003/008 vigente.

### **1.3. Justificación e importancia**

El proyecto busca realizar actividades investigativas respecto al análisis de los esquemas de conexión y evaluación de los elementos del sistema de puesta a tierra de la línea de subtransmisión San Rafael-Mulalo con el fin de proporcionar la mayor calidad y sobre todo un mejor servicio en la entrega de energía eléctrica para la sociedad. Por tal razón, tanto los profesionales como los usuarios de la energía suministrada por ELEPCO S.A., deben poseer una información muy valiosa acerca de las variables que provocan el fenómeno de las descargas, de la desconexión parcial o total de los sistemas de seguridad a través de herramientas informáticas de modelado y las anomalías que provocan ya sean descargas y perturbaciones externas que producen daños en la calidad de energía que se está entregando.

### **1.4. Objetivos**

#### **1.4.1. Objetivo General**

Realizar un estudio de los esquemas de conexión de los elementos del sistema de puesta a tierra de la línea de subtransmisión San Rafael-Mulalo, como una medida para garantizar la confiabilidad del servicio eléctrico FMIK (frecuencia media) y TTIK (tiempo promedio) de interrupciones de la Empresa Eléctrica Cotopaxi ELEPCO S.A.

#### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Analizar el comportamiento de cada uno de los esquemas frente a sobrevoltajes, mediante simulaciones de las ondas de voltaje producidas por descargas atmosféricas, y con ello analizar las corrientes implicadas en la red durante esta falla transitoria.
- Analizar el comportamiento de los elementos de sobre-corriente asociados a los esquemas de conexión presente a lo largo de la línea de subtransmisión San Rafael-Mulalo de 69 kV.

- Determinar el mejor esquema de conexión del sistema de puesta a tierra mediante los valores de corrientes en los elementos de protección de la línea de subtransmisión San Rafael-Mulalo de ELEPCO S.A.

## **CAPÍTULO II**

### **2. MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Introducción**

En el presente capítulo se abarcará definiciones y terminología, la cual nos ayudará a tener un breve conocimiento acerca del área de estudio y, sobre todo, identificar los diferentes elementos que interfieren en el análisis de las líneas de subtransmisión como también las puestas a tierras para mejorar los factores técnicos de calidad.

#### **2.2. Fundamentación teórica**

##### **2.2.1. Sistemas Eléctricos de Potencia**

Es un conjunto de instalaciones y equipos para producir, transportar y distribuir energía eléctrica a los usuarios de una zona, ciudad, región o país. La función del sistema eléctrico de potencia es abastecer a todos los usuarios con energía eléctrica tan económicamente como sea posible, en la cantidad deseada y con un nivel aceptable de calidad, seguridad y confiabilidad. (Turmero, 2011)

##### **2.2.2. Componentes del Sistema Eléctrico de Potencia**

Su funcionamiento se basa en la generación de un par de fuerzas que aparecen en los conductores de la armadura o inducido cuando estos son recorridos por una corriente eléctrica, siempre y cuando estos estén sometidos a la acción de un campo magnético producido por el circuito inductor.

###### **a. Subestación**

Es una instalación destinada a modificar y establecer los niveles de voltaje de una infraestructura eléctrica, para facilitar la transmisión y distribución de la energía eléctrica.

### **b. Transformadores de Potencia**

Equipos de subestaciones para elevar y reducir los niveles de voltaje de operación del sistema eléctrico.

### **c. Líneas de Distribución**

Equipos para transportar energía eléctrica entre dos puntos; entre ellas se encuentran las líneas de transmisión, subtransmisión y distribución.

### **d. Líneas de Subtransmisión**

El sistema de subtransmisión permite llevar la energía eléctrica desde sus fuentes de suministro (centrales de generación y nodos SNI) hasta sus centros de carga o subestaciones, mediante líneas eléctricas con niveles de voltaje que van desde 13,8 [kV] hasta 69 [kV], bajo un esquema eléctrico de tipo radial.

Como se aprecia en la Tabla 1, el sistema de subtransmisión está configurado de la siguiente manera:

**Tabla 1**

#### **Líneas de subtransmisión de 69 KV**

##### **LINEA**

**AMBATO – SALCEDO**

**SALCEDO – SAN RAFAEL**

**SAN RAFAEL – LAYGUA**

**LAYGUA – MULALO**

**MULALO – LASSO**

**LASSO – SIGCHOS**

**SAN RAFAEL – PUJILÍ**

**LAIGUA – LA COCHA**

**CALOPE – LA MANA**

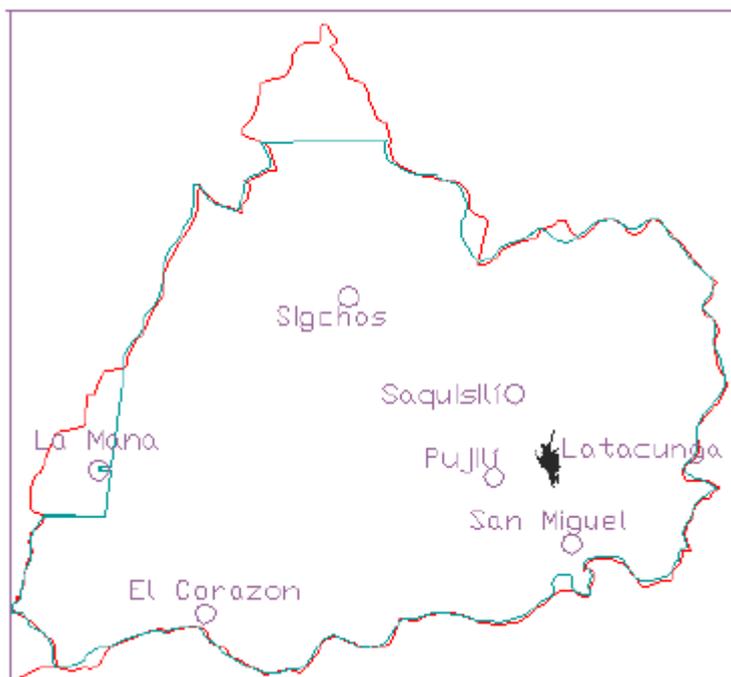
**LA CALERA – CRS**

La subestación La Maná se conecta radialmente a la S/E Quevedo. (VILLACRÉS, 2008)

### 2.2.3. Área de concesión de la Eléctrica ELEPCO S.A.

Desde el año de 1978 paralelamente a la remodelación de redes se inicia la expansión del sistema y es así que en forma planificada y paulatina fue extendiendo sus redes eléctricas de distribución y actualmente ha rodeado las redes de las empresas eléctricas adyacentes impidiendo su avance.

Con el fin de dar cumplimiento a la Ley de Régimen del Sector Eléctrico y en una reunión con todas las Empresas Eléctricas del País se fijaron los límites de áreas de concesión y en el mes de octubre de 1998 en las oficinas del Consejo Nacional de Electricidad CONELEC, organismo rector del sector energético se firmó el acta de Límites de ELEPCO S.A., del área de concesión tal como se indica en la Figura 1. (NICOLAY & EDUARDO, 2011)



**Figura 1 Área de concesión de ELEPCO S.A.**

**Fuente:** (NICOLAY & EDUARDO, 2011)

### 2.2.4. Sobrevoltajes en las líneas de Transmisión

Se define sobrevoltaje como el fenómeno que interviene en una red eléctrica incrementando el valor de voltaje entre fase a tierra o entre fases, es decir, una onda o impulso de voltaje que sobrepasa el valor del voltaje nominal de la red.

Los sobrevoltajes pueden clasificarse según varios criterios en:

- Por la duración.
  - Temporales
  - Transitorios
- Por su origen
  - Sobrevoltajes por Maniobra
  - Sobrevoltajes por Ferro resonancia
  - Sobrevoltaje por Descargas Atmosférica. (SCHNEIDER ELECTRIC, 2010)

### **2.2.5. Características de las descargas atmosféricas**

Se define Descarga Eléctrica Atmosférica como la transferencia de carga eléctrica positiva o negativa, entre la nube, nube-nube, nube a tierra y según investigaciones recientes entre nube e ionosfera.

Se llama sistema de protección contra descargas atmosféricas, al conjunto de elementos que proporcionan el medio para que una descarga pueda incidir con seguridad sobre una construcción y sea conducida en forma inofensiva hasta tierra, de manera que no origine daños durante su recorrido. (AUDOMAR & BARTOLO., 2002)

Las descargas atmosféricas pueden ser:

- Intra nube.
- Tierra y nube.
- Entre dos nubes.
- De una nube al aire circundante.

### **2.2.6. Características de los rayos**

El rayo es un fenómeno físico que ha sido estudiado ampliamente desde hace mucho tiempo con el fin de poder determinar un modelo matemático que refleje su comportamiento eléctrico y que sea establecido como un estándar para estudios que involucren al rayo, se han realizado múltiples ensayos como captura de rayo y estos resultados mediante técnicas estadísticas han dado origen a la caracterización de los parámetros de la forma de onda del rayo, la

cual se muestra en la Figura 2, cuyos parámetros se presentan en la Tabla 2 que está a continuación.

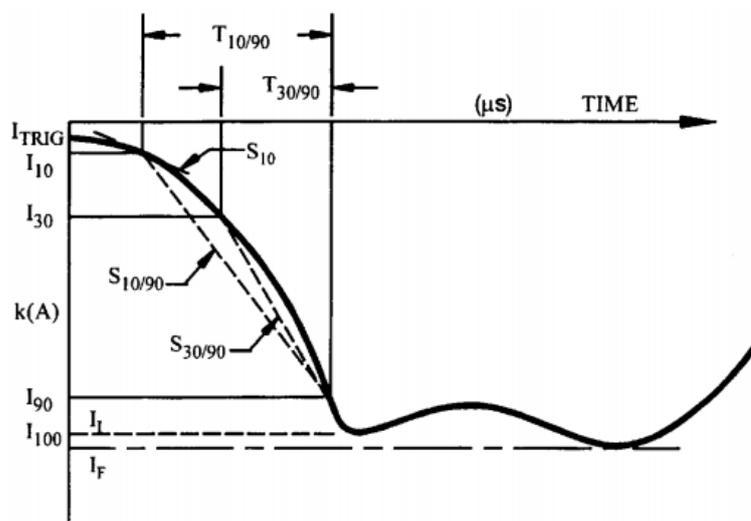


Figura 2 Descripción de parámetros para la forma de onda de rayo

Fuente: (IEEE Std 1410-2004)

Tabla 2

### Parámetros de distribución logarítmica normal para descargas

Parámetros de distribución normal logarítmica para descargas negativas				
Parámetro	Primera descarga		Segunda descarga	
	Mediana	$\beta$ , desviación logarítmica estándar	Mediana	$\beta$ , desviación logarítmica estándar
FRENTE, $\mu s$				
$t_{d 10/90} = T_{10/90}/0.8$	5.63	0.576	0.75	0.921
$t_{d 30/90} = T_{30/90}/0.6$	3.83	0.553	0.67	1.013
$t_m = I_F/S_m$	1.28	0.611	0.308	0.708
PENDIENTE $kA/\mu s$				
$S_m$ , Máximo	24.3	0.599	39.9	0.852
$S_{10}$ , al 10%	2.6	0.921	18.9	1.404
$S_{10/90}$ , 10-90%	5.0	0.645	15.4	0.944
$S_{10/90}$ , 30-90%	7.2	0.622	20.1	0.967
CORRIENTE CRESTA, $kA$				
$I_L$ , inicial	27.7	0.461	11.8	0.530
$I_F$ , final	31.1	0.484	12.3	0.530
Inicial/final	0.9	0.230	0.9	0.207
COLA, $t_n$ , $\mu s$	77.5	0.577	30.2	0.933
CARGA, $Q_I$ , C	4.65	0.882	0.938	0.882
$\int I^2 dt$ , $(kA)^2 s$	0.057	1.373	0.0055	1.366
Intervalo entre descargas, ms			35	1.066

Fuente: (IEEE Std 1410-2004)

Descripción de los parámetros:

$I_{10}$ : 10% de intercepción a lo largo de la forma de onda de corriente.

$I_{30}$ : 30% de intercepción a lo largo del frente de onda de corriente.

$I_{90}$ : 90% de intercepción a lo largo de la forma de onda de corriente.

$T_{10/90}$ : Tiempo de intercepción entre  $I_{10}$  e  $I_{90}$  en el frente de onda.

$T_{30/90}$ : Tiempo de intercepción entre  $I_{30}$  e  $I_{90}$  en el frente de onda.

$S_m$ : Tan G, tasa máxima de aumento de corriente a lo largo del frente de onda.

$S_{10}$ : Tasa instantánea de aumento de la corriente en  $I_{10}$ .

$S_{10/90}$ : Pendiente media (a través de la intercepción entre  $I_{10}$  e  $I_{90}$ ).

$S_{30/90}$ : Pendiente media (a través de la intercepción entre  $I_{30}$  e  $I_{90}$ ).

$Q_I$ : Carga de impulso de la corriente en la forma de onda.

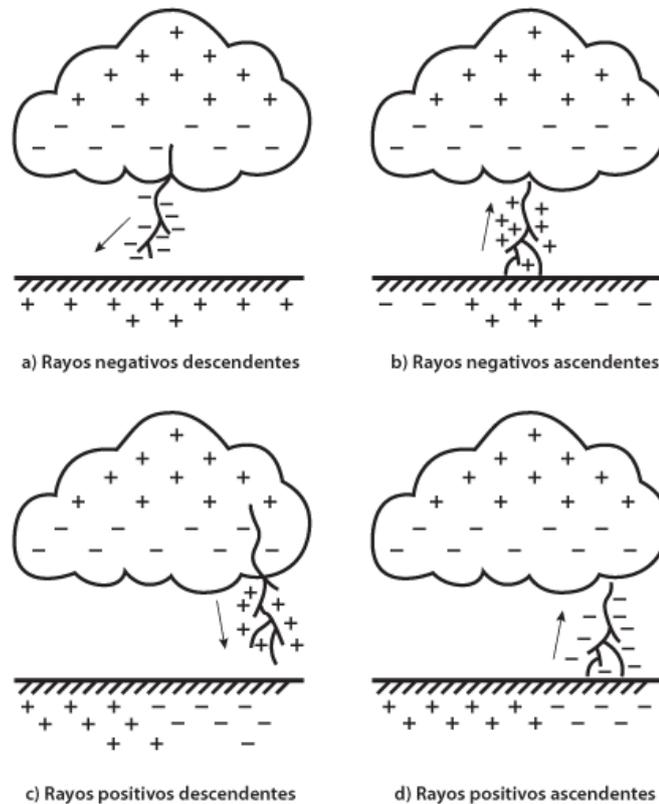
### 2.2.7. Protecciones contra descargas atmosféricas

La protección contra descargas atmosféricas de una estructura, no se logra contra lo que normalmente se cree, con la instalación de una varilla y una conexión a tierra (pararrayos de Franklin), ya que la acción de este dispositivo es limitada; en vista de esto, la técnica moderna de protección ha desarrollado el uso de la barra de Franklin y establece la colocación de conductores y puntas en los sitios en los que pueden iniciarse pilotos secundarios, tales como esquinas y aristas de las azoteas, es necesario pues, no hablar de un pararrayos, sino de la instalación de un sistema de pararrayos convenientemente estudiado para proporcionar protección a cada estructura en particular. (AUDOMAR & BARTOLO., 2002)

De los registros estadísticos de las descargas atmosféricas en el mundo se conoce que el 50% son intra nube (nube-nube), el 40 % son nube-tierra y el 10% restante son nube-aire; por otra parte se conoce también que de las descargas nube tierra el 90% son descendentes de polaridad negativa “-”

(categoría 1), menos del 10% son descendentes de polaridad positiva “+”(categoría 2), y finalmente se conoce que menos del 5% son descargas ascendentes (Tierra-Nube) que son relativamente raras y ocurren normalmente en zonas de gran altitud, desde los picos de las montañas o desde altas estructuras, las cuales pueden tener polaridad “+”(categoría 3) o negativa “-”(categoría 4).

Un aspecto adicional que se debe tener en cuenta es la distorsión que la presencia de objetos altos puede provocar en los parámetros de un rayo respecto al que se originaría en terreno plano. En la Figura 3 se muestra las cuatro categorías de rayos. (Arcioni & Giménez, 2013)



**Figura 3 Tipos de rayos (nube-tierra)**

**Fuente:** (Arcioni & Giménez, 2013)

### 2.2.8. Efectos de las descargas atmosféricas

Se pueden evidenciar diferentes efectos al producirse una descarga nube-tierra tanto descendente como ascendente, tales como efectos térmicos, electromagnéticos, acústicos, luminosos y químicos en zonas cercanas al punto de descarga, de los cuales los que más influyen en las redes de

distribución son los electromagnéticos ya que ocasionan los siguientes efectos:

- **Sobrevoltaje por carga estática:** Este efecto se le clasifica como un sobrevoltaje externo, ya que, se presentan en líneas de distribución por el simple hecho de que existen nubes sobre estas, y que las nubes sean desplazadas por el viento; este caso es menos peligroso, ya que no tiene mucha incidencia en la operación del sistema.
- **Sobrevoltaje por descarga directa:** Este tipo de sobrevoltajes son los menos frecuentes en las instalaciones, pero son los que pueden causar los daños más graves, debido a que puede alcanzar valores hasta de 200 [kA] instantáneos con frentes de onda muy altos que introducen enormes esfuerzos dinámicos y térmicos en las instalaciones. Este tipo de sobrevoltajes afectan a los aislamientos de las instalaciones que se encuentran a lo largo de las líneas de distribución.
- **Sobre voltajes por descargas indirectas:** Las descargas indirectas son aquellas que no impactan directamente la línea, pero que retornan por un canal ionizado cercano a la línea (dentro de un radio de aproximadamente 200 [m]). Este tipo de voltaje es el más frecuente y puede ser grave dependiendo de la intensidad de descarga, ya que los sobrevoltajes pueden llegar a estar entre 100 y 200 [kV] con corrientes entre 25 a 100 [kA].
- **Sobrevoltaje por flameo inverso:** Este sobre voltaje se produce al caer la descarga directa en un cable de guarda o en el poste, el potencial de éste puede elevarse por encima del potencial de los conductores, lo que produce fallas fase-tierra, ya que aparece una diferencia de potencial suficiente para producirse flameo (Blackflashover) entre el poste y los conductores.

### 2.2.9. Modelamiento de líneas

El primer paso para analizar el comportamiento transitorio de una red de tierra, es definir el método a emplear para su simulación, así como, calcular

sus parámetros eléctricos. El modelo a utilizar fue el enfoque de la línea de transmisión, en este modelo el conductor enterrado se divide en segmentos aplicando la técnica de los elementos finitos, cada uno de estos segmentos se considera como una línea de transmisión. Para analizar el comportamiento transitorio puede emplearse con éxito el modelo de línea de parámetros distribuidos de MATLAB-Simulink. (Matlab: The language of technical computing, 2011)

### 2.2.10. Indicadores de Calidad Técnica del Servicio Eléctrico

Para el cálculo de los índices de calidad se considerarán las interrupciones del sistema con duración mayor a tres 3 minutos, no serán consideradas las interrupciones con duración igual o menor a tres 3 minutos.

Los indicadores técnicos de continuidad del servicio eléctrico FMIK y TTIK están definidos en la Normativa de Calidad del Servicio conforme al artículo NCS 1.1.4, asociados a la continuidad del servicio eléctrico, y corresponden a:

- **Frecuencia Media de Interrupción (FMIK):** Para un período determinado, representa la cantidad de veces que el KVA promedio sufrió una interrupción de servicio.

$$FMIK_{Rd} = \frac{\sum_i kVA f s_i}{kVA_{inst}}$$

$$FMIK_{Aj} = \frac{\sum_i kVA f t_{Aj}}{kVA_{instAj}}$$

- **Tiempo total de interrupción (TTIK):** Para un período determinado, representa el tiempo total en que el KVA promedio no tuvo servicio. (ARCONEL 003/008, 2008)

$$TTIK_{Rd} = \frac{\sum_i kVA f s_i * T f s_i}{kVA_{inst}}$$

$$TTIK_{Rd} = \frac{\sum_i^{Aj} kVA_{f_{SiAj}} * T_{f_{SiAj}}}{kVA_{instAj}}$$

Donde:

*TTIK*: Frecuencia Media de Interrupción por kVA nominal instalado, expresada en fallas por kVA.

*FMIK*: Tiempo Total de Interrupción por kVA nominal instalado, expresado en horas por kVA.

$\sum_i$ : Sumatoria de todas las interrupciones del servicio “i” con duración mayor a tres minutos, para tipo de causa considerada en el período en análisis.

$\sum_i^{Aj}$ : Sumatoria de todas las interrupciones de servicio en el alimentador “Aj” en el período en análisis.

$kVA_{f_{Sj}}$ : Cantidad de kVA nominales fuera de servicio en cada una de las interrupciones “i”.

$kVA_{f_{Sj}}$ : Cantidad de kVA nominales instalados.

$T_{f_{Sj}}$ : Tiempo de fuera de servicio, para la interrupción “i”.

$R_d$ : Red de distribución global.

$A_j$ : Alimentador primario de medio voltaje “j”.

### 2.2.11. Límites de los índices de calidad

Los valores límites admisibles, para los índices de calidad del servicio técnico, aplicables son los que se observa en la Tabla 3.

**Tabla 3****Límites admisibles de los índices de calidad de servicio técnico.**

Índices	Lim. FMIK	Lim. TTIK
<b>Red</b>	4.0	8.0
<b>Alimentador Urbano</b>	5.0	10.0
<b>Alimentador Rural</b>	6.0	18.0

**Fuente:** ELEPCO S.A. 2016

Para los años 2015 y 2016 el cálculo de los índices de calidad de servicio técnico de todos los alimentadores que conforman la ELEPCO, se observa en la Tabla 4.

**Tabla 4****Índices de Calidad de Servicio de ELEPCO**

Índices de Calidad de ELEPCO		
Año	Lim. FMIK	Lim. TTIK
<b>2015</b>	5,58	3,34
<b>2016</b>	7,3	5,2

**Fuente:** ELEPCO S.A. 2016

Con relación al indicador de Frecuencia Media de Interrupciones FMIK, el resultado media móvil anual a noviembre fue de 7,3 con un incremento en relación al mes de Diciembre del 2015 de 5,58 y superior a la meta establecida por el CONELEC de 4. El resultado media móvil anual del indicador de Tiempo Total de Interrupciones TTIK, varía en este mismo período de tiempo, en los valores de 3,34 a 5,2 horas, siendo superior a la meta de 4,6.

El incremento de estos indicadores se debe a que existieron durante el año varios proyectos de reforzamiento y remodelación, es decir, eventos los cuales era necesario realizar interrupciones programadas del servicio eléctrico a nivel de cabecera, con la finalidad de llevar a cabo estos proyectos y así evitar cortes en horas picos, adicional a esta eventualidad en los tres últimos meses existió una baja de frecuencia desde el trasmisor, lo que ocasionó que saliera carga del sistema de ELEPCO S.A.

## CAPÍTULO III

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Antecedentes de investigación

En el actual Sistema Eléctrico de Distribución de la Empresa Eléctrica Cotopaxi (ELEPCO S.A.), se tiene como política principal la mejora continua de sus procesos y dentro de ello la mejora de la calidad del producto técnico, presentando así un rango de calidad y confiabilidad en el sistema tanto de distribución como de generación de energía.

En la tesis “MATLAB PARA EL ANÁLISIS DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA” (2009). Previo la obtención del título de ingeniero eléctrico los autores, Hernán Catarí Ramos y Rodmy Miranda Ordoñez, desarrollan un sistema en el cual se exponen los beneficios y manejo de los diferentes componentes que se tiene en el Matlab. (Hernan & Rodmy, 2009)

En la tesis “ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN DE LÍNEAS DE EXTRA ALTA TENSIÓN ANTE DEFECTOS RESISTIVOS A TIERRA” (2012). Previo la obtención del título de ingeniero eléctrico los autores Francisco Ashfield y Verónica Azevedo, desarrollan un análisis del comportamiento de los sistemas de protección frente a variaciones de voltajes extremadamente altas para comprobar el reflejo de los resultados frente a la tierra del sistema. (Francisco & Verónica, 2012)

En la tesis “MODELACIÓN EN MATLAB-SIMULINK DEL COMPORTAMIENTO TRANSITORIO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA” (2016). Previo la obtención del diplomado de ingeniero eléctrico el autor Carlos Raúl Sánchez Rodríguez desarrolla un modelo del comportamiento transitorio de los sistemas de puesta a tierra con la finalidad de mostrar los resultados obtenidos y verter un informe complaciente. (Carlos Raúl, 2016)

### 3.2. Fundamentación legal

Según el artículo 5 de la Ley de Régimen del Sector Eléctrico establece como uno de los objetivos fundamentales “proporcionar un servicio de alta calidad y confiabilidad que garantice su desarrollo económico y social, y el de asegurar la confiabilidad, igualdad y uso generalizado de los servicios e instalaciones de transmisión y distribución de electricidad”, además estipula que “la continuidad del servicio dentro de los niveles de calidad, de los puntos de conexión es de responsabilidad del Transmisor y de los Agentes.”

### 3.3. Hipótesis

Con el análisis y evaluación de los esquemas de conexión de los elementos del sistema de puesta a tierra se podrá determinar el efecto que tiene en los índices de calidad y el índice de interrupción, en sí la calidad en el suministro de energía.

### 3.4. Variables de investigación

**Variable Independiente:** Análisis del estado actual de la resistividad del sistema de puesta a tierra en la línea de subtransmisión a 69kV San Rafael-Mulalo.

**Variable Dependiente:** Garantizar el tiempo de actuación de los elementos de protección y mejorar los índices de calidad técnica.

### 3.5. Operacionalización de variables

**Tabla 5**

**Operacionalización de variable independiente**

Variable (Independiente)	Definición	Dimensionamiento	Indicador
<b>Análisis del estado actual de la resistividad del sistema de puesta a tierra en la línea de subtransmisión a 69kV San Rafael-Mulalo.</b>	Representa la resistencia	Resistividad del suelo	$[\Omega]$
	específica del suelo a cierta profundidad y se obtiene	Valor pico de la descarga atmosférica	$[kA]$
	indirectamente al procesar un grupo de medidas de campo; su magnitud se expresa en $[\Omega]$ , es inversa a la conductividad.	Tiempos de actuación de las protecciones	$[mseg]$

Tabla 6

**Operacionalización de variable dependiente**

Variable (Dependiente)	Definición	Dimensionamiento	Indicador
<b>Garantizar el tiempo de actuación de los elementos de protección y mejorar los índices de calidad técnica.</b>	La calidad del servicio de transmisión es un conjunto de características sobre la continuidad de la entrega de potencia.	FMIK (frecuencia media)	De acuerdo a la regulación del ARCONEL 003/008
		TTIK (tiempo promedio)	De acuerdo a la regulación del ARCONEL 003/008
		Tiempos de actuación de las protecciones a una resistividad de 10 [ $\Omega$ ]	[ <i>mseg</i> ]

**3.6. Modalidad de la investigación****3.6.1. Investigación bibliográfica**

Según el autor (Santa Palella y Feliberto Martins (2010)), define: el diseño bibliográfico, se fundamenta en la revisión sistemática, rigurosa y profunda del material documental de cualquier clase. Se procura el análisis de los fenómenos o el establecimiento de la relación entre dos o más variables.

Para el desarrollo del presente proyecto de investigación se hizo uso de varias fuentes bibliográficas que permitieron identificar y acceder a la información acerca de las descargas atmosféricas, puestas a tierra y sobre todo al proceso de la realización de una simulación adecuada con la finalidad de contribuir a la investigación planteada.

### **3.6.2. Investigación de campo**

Según el autor (Santa Palella y Feliberto Martins (2010)), define: La Investigación de campo consiste en la recolección de datos directamente de la realidad donde ocurren los hechos, sin manipular o controlar las variables. Estudia los fenómenos sociales en su ambiente natural.

La investigación se la desarrollara en la Empresa Eléctrica Provincial de Cotopaxi S.A. ya que este lugar es donde se encuentra el objeto de estudio. Se obtendrá la información directamente del estado físico en que se encuentren los sistemas de puesta a tierra de los postes, también la revisión y análisis de las rendiciones de cuenta proporcionado por la empresa.

### **3.6.3. Investigación experimental**

Según el autor (Fidias G. Arias (2012)), define: La investigación experimental es un proceso que consiste en someter a un objeto o grupo de individuos, a determinadas condiciones, estímulos o tratamiento (variable independiente), para observar los efectos o reacciones que se producen (variable dependiente).

En la investigación planteada se realizó un conjunto de actividades metódicas y técnicas para obtener información y datos necesarios sobre la simulación generada. Se obtendrá información por medio de la observación de los hechos, y se modificaran ciertas variables de estudio con el fin de describir y analizar lo que ocurriría en determinadas condiciones de prueba.

### **3.7. Población y muestra**

De acuerdo con Webster (1998) “una muestra aleatoria simple es la que resulta de aplicar un método por el cual todas las muestras posibles de un determinado tamaño tengan la misma probabilidad de ser elegidas,”

En este caso de estudio se ha utilizado un muestreo aleatorio simple, el cual consta de escoger aleatoriamente el número de muestras que van a ser tomadas en cuenta con la finalidad de representar al universo y sea un valor aproximado al real.

### **3.8. Técnicas de recolección de datos**

#### **3.8.1. La observación en la simulación**

Para la obtención de datos necesarios para implementar nuestro módulo de pruebas se necesita aplicar la técnica de observación y obtenerlos experimentalmente mediante el funcionamiento bajo carga de cada uno de los motores de corriente continua, observar minuciosa y detalladamente los datos presentados por los instrumentos de medida presentes en el laboratorio y conectados al momento de aplicar esta técnica.

#### **3.8.2. Instrumentos**

Para la recolección de datos del estado del sistema de puesta a tierra se ha utilizado como instrumento de medida al MEGGER, el cual proporciona una lectura de los valores de resistencia en  $[\Omega]$ , el cual ayuda a determinar el estado del sistema de puesta a tierra y sobre todo su influencia sobre los resultados.



electrificación con la finalidad de mejorar y ofrecer una mejor calidad de vida en estos sectores.

#### 4.2.1. Características técnicas

La Figura 5 se muestra la subestación San Rafael, la cual cuenta con un transformador de potencia de 10/13[MVA], una barra simple con tres posiciones de 69 [kV], una de las cuales hace la función de fuente. El sistema de protección eléctrica para el transformador se basa en un relé diferencial de corriente (87) cuya operación desconecta al interruptor de llegada de 69 [kV] desde la subestación Mulalo (fuente) dejando sin servicio a toda la barra y por ende la posición de salida de línea de 69 [kV] hacia la subestación Pujilí. Este esquema de operación se implanta debido a que en el lado de alta del transformador de potencia existe un seccionador tripolar como equipo de corte.



**Figura 5** Subestación San Rafael

A continuación, en la Tabla 7, se presenta una lista de los equipos eléctricos de corte y potencia que existen en la subestación San Rafael.

Tabla 7

## Detalle de elementos subestación San Rafael

SUBESTACION SAN RAFAEL			
ELEMENTO	MARCA	VOLTAJE	CORRIENTE
Transformadores de corriente	ASEA	69 KV	
Interruptores	ASEA	69 KV	2000 A
Seccionador en llegada		115 KV	1200 A
Seccionador en salida		115 KV	1200 A
Seccionador entrada al transformador		115 KV	1200 A
Transformador de voltaje	AREVA	72,5 KV	
Interruptor en gas	MITSUBISHI	72,5 KV	600 A
Interruptor llegada de Mulalo	AREVA	72,5 KV	1200 A
Seccionador llegada de Mulalo	LAGO	72,5 KV	800 A
Seccionador salida de Mulalo	LAGO	72,5 KV	800 A
Transformador de potencia	FEDERAL PIONNER	69 KV / 13,8 KV	
Transformador de servicios auxiliares	FEDERAL PIONNER	13,8 KV / 220 V	
Alimentador 1	SIEMENS	Ur: 24,0 KV Up: 124 KV	Isc: 25,0 KA Ir: 1250 A
Alimentador 2	SIEMENS	Ur: 24,0 KV Up: 124 KV	Isc: 25,0 KA Ir: 1250 A

Fuente: ELEPCO S.A.

A continuación, en la Figura 6, se presenta una vista de la subestación Mulalo.



**Figura 6 Subestación Mulalo**

A continuación, en la Tabla 8, se procede con la descripción técnica de la subestación Mulalo.

**Tabla 8**

**Detalle elementos subestación Mulalo**

SUBESTACION MULALO			
ELEMENTO	MARCA	VOLTAJE	CORRIENTE
Interruptor en gas	MITSUBISHI	72,5 KV	600 A
Interruptor en gas	MITSUBISHI	72,5 KV	600 A
Interruptor en gas	MITSUBISHI	72,5 KV	600 A
Transformadores de potencial	NISSIN ELECTRIC CO. LTD.	350 KV	
Transformador de potencia	MITSUBISHI	69 KV / 13,8 KV	
Transformador de servicios auxiliares	SHIKOKU	13,8 KV / 220 V	
Alimentador 1	MITSUBISHI	13,8 KV	600/1200 A
Alimentador 2	MITSUBISHI	13,8 KV	600/1200 A
Alimentador 4	MITSUBISHI	13,8 KV	600/1200 A

**Fuente:** ELEPCO S.A.

### 4.3. Probabilidad de Caída de Rayos en las Redes Aéreas

Las líneas aéreas reciben descargas por 100 [km] de línea, según la relación empírica encontrada por Eriksson, es decir que, la probabilidad de que caiga un rayo en una línea de aérea (N), ha sido ampliamente estudiada por lo cual se ha obtenido la siguiente ecuación.

$$N = 0.10 * Ng * (b + 28 * H^{0.6})$$

Donde:

*H*: Altura de la línea [m].

*b*: Ancho de la línea [m].

*Ng*: Densidad de descarga a tierra a tierra  $\left[ \frac{\text{descargas}}{\text{km}^2} \text{ por año} \right]$

Donde la densidad de descargas a tierra se relaciona directamente al nivel ceraúnico por la siguiente relación según la GIGRE.

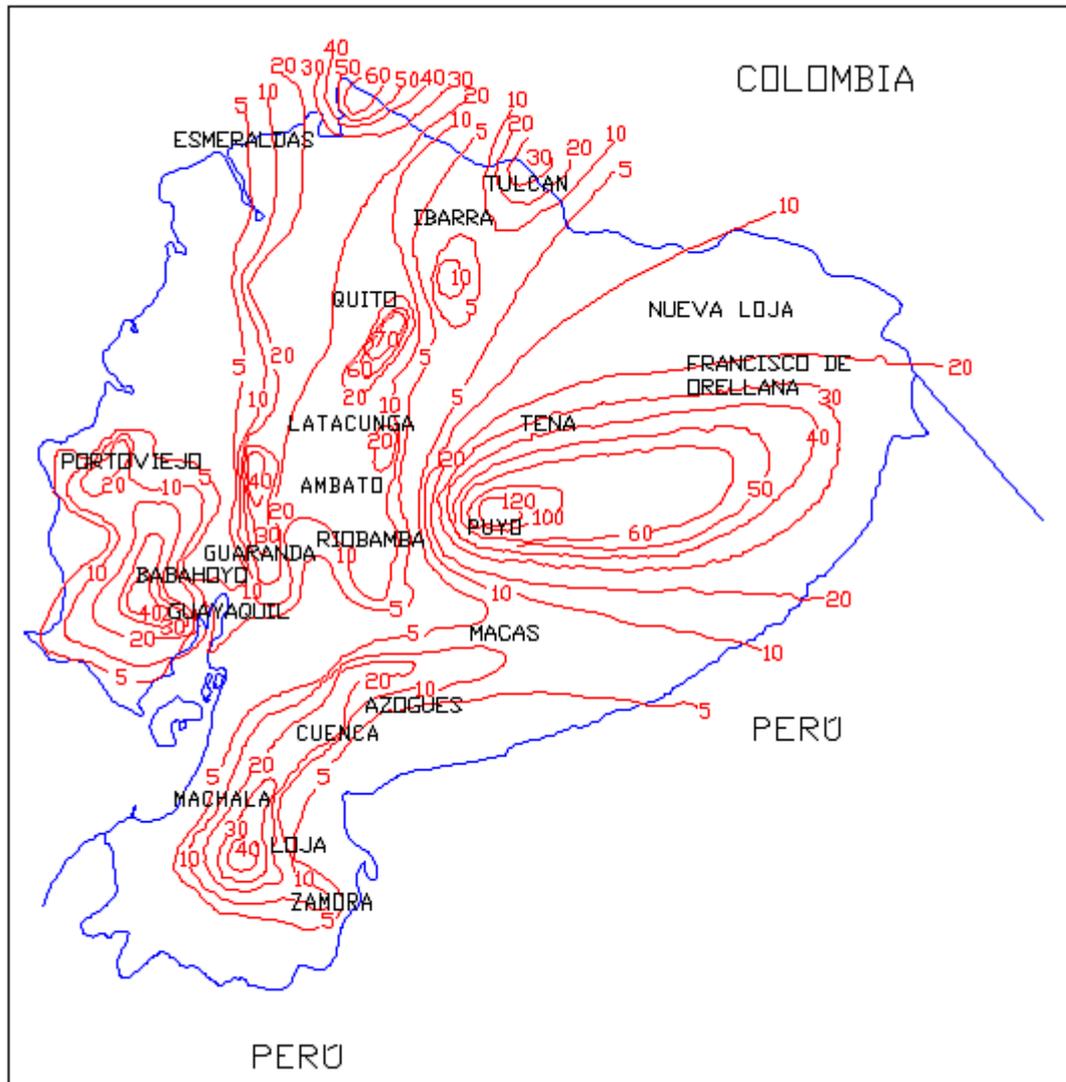
$$Ng = 0.04 * (Td)^{1.25} \left[ \frac{\text{descargas}}{\text{km}^2} \text{ por año} \right]$$

Donde:

*Td*: Nivel ceraúnico  $\left[ \frac{\text{descargas}}{\text{km}^2} \text{ por año} \right]$

El nivel ceraúnico se define como el número de días al año en el cual se ha percibido la caída de un rayo al menos una vez durante las veinticuatro horas, los cuales se los puede representar a través del mapa ceraúnico, cabe recalcar que cada país tiene su propio nivel ceraúnico, en el presente caso de estudio se escoge el mapa ceraúnico del Ecuador y se tomará específicamente el valor del nivel de la provincia de Cotopaxi.

En la Figura 7 se observa el mapa ceraúnico del Ecuador donde representa el número de descargas atmosféricas que se producen al año en cada una de sus provincias.



**Figura 7 Mapa del Nivel Ceraúnico del Ecuador**

**Fuente:** (Preciado & Echeverria, 2008)

#### 4.3.1. Cálculo de Densidad de Descargas a Tierra

$$Ng = 0.04 * (Td)^{1.25} \left[ \frac{\text{descargas}}{\text{km}^2} \text{ por año} \right]$$

$Td$ : Según la Figura 7 la zona de Latacunga se encuentra ubicado en un nivel ceraúnico de 20, pero por recomendación (condiciones extremas de trabajo) se utilizó un valor de 30, con esto se pudo realizar un estudio en una condición más baja.

$$Ng = 0.04 * (30)^{1.25}$$

$$Ng = 2,8084 \left[ \frac{\text{descargas}}{\text{km}^2} \text{ por año} \right]$$

### 4.3.2. Cálculo de la probabilidad de caída de rayos

El ancho y la altura de las líneas son proporcionados por ELEPCO.

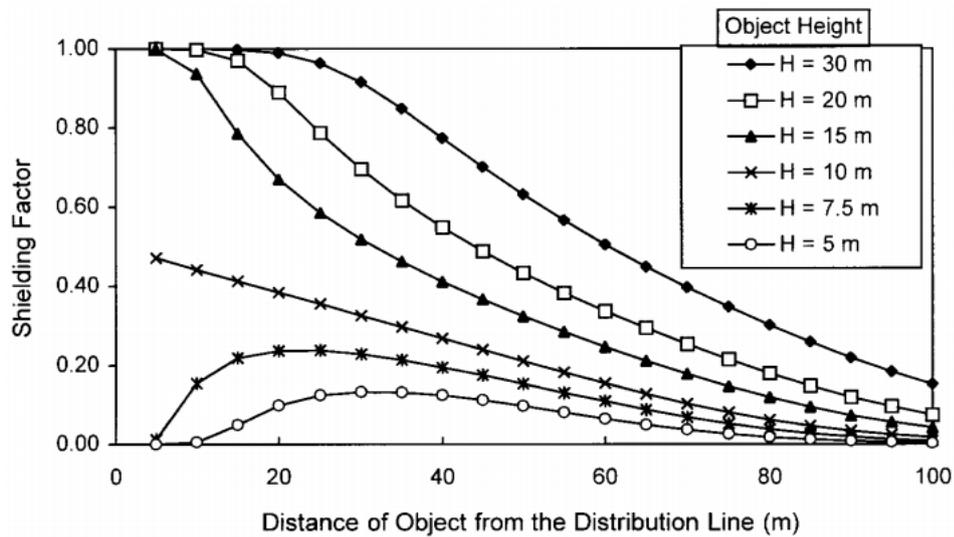
$$N = 0.10 * Ng * (b + 28 * H^{0.6})$$

$$b = 2$$

$$H = 12$$

$$N = 35,4858$$

### 4.3.3. Cálculo del número de impactos por descargas directas



**Figura 8 Factores de apantallamiento debido a objetos cercanos, para una altura de la línea de distribución de 10m**

**Fuente:** IEEE Std 1410-2004

Sabiendo que existe una residencia de 15 m de altura y que se encuentra a 15 m a la izquierda de la línea y que en el lado derecho de la línea solo está la carretera y no se encuentran objetos cercanos por lo tanto  $Sf_{dr} = 0$ , el cual se obtiene de la Figura 8, el factor de apantallamiento es de:

$$N_s = N[1 - (Sf_{iz} + Sf_{dr})]$$

$$Sf_{iz} = 0,78$$

$$N = 35,4858$$

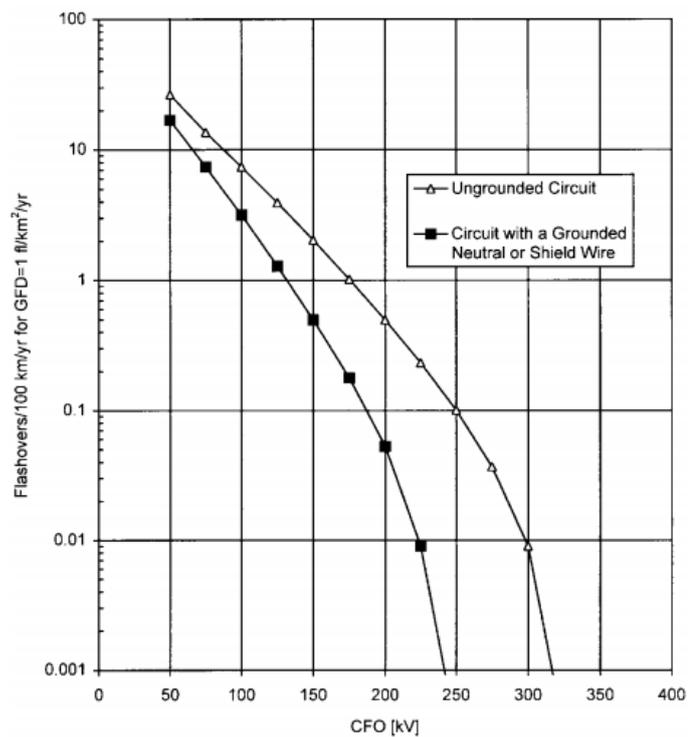
$$N_s = 7,8068$$

#### 4.3.4. Cálculo del número de impactos por descargas inducidas

$N_{s_{ind}}$ : Número de descargas inducidas.

$CFO$ : Sobrevoltaje crítico.

$n_{in}$ : Números de voltaje inducidos. (Tomado de la Figura 9)



**Figura 9 Número de voltajes inducidos vs. Nivel de aislamiento de la línea**

**Fuente: IEEE Std 1410-2004**

#### Tabla 9

##### Aislador primario (CFO)

	Aisladores	kV
<b>Pin</b>	ANSI 55-4	105
	ANSI 55-5	120
	ANSI 55-6	140

**Fuente: IEEE Std 1410-2004**

Para el cálculo de flameo inducido es necesario obtener el CFO y posteriormente se utilizó la curva de la Figura 9 para circuitos con puesta a tierra.

*CFOT*: CFO total

*CFOC*: CFO cruceta

*CFOP*: CFO poste

*CFOA*: CFO aislador Pin ANSI 55-6 (Tomado de la Tabla 9)

El CFO total se obtiene de la suma de todos los CFO's, en caso de estudio el CFO de la cruceta y del poste son considerados cero, ya que, la cruceta es de hierro y el poste es de hormigón con estructura de hierro lo que significa, que, tiene bajo aislamiento.

$$CFOT = CFOC + CFOP + CFOA$$

$$CFOA = 140 \text{ kV}$$

$$n_{in} = 0,71$$

$$Ns_{ind} = n_{in} * Ng$$

$$Ns_{ind} = 1,994 \left[ \frac{\text{descargas}}{\text{km}} \text{ por año} \right]$$

Con estos datos se tiene una probabilidad de la incidencia de rayos sobre la línea de subtransmisión de San Rafael-Mulalo, ya sea directo o indirecto, con esto se puede estimar el número de incidencias que se presentarían por año debido a descargas atmosféricas en dicha Subestación el cual será de 35,4858 descargas por año. Para modelar la forma de onda en el dominio del tiempo del rayo en el software Simulink, se usa la forma de onda establecida en las normas de la IEEE (pruebas del BIL del equipamiento eléctrico), donde se aplica la forma de onda 1,2/50[ $\mu\text{seg}$ ], ya que esta forma de onda es la más crítica que soportarían los equipos debido a sobrevoltajes.

Para la simulación se ocupará valores normalizados y estandarizados para el pico de corriente del rayo estos son de 10 [kV], 20 [kV] y 30 [kV] ya que son valores que tienen mayor probabilidad de ocurrencia.

#### 4.3.5. Calculo del voltaje inducido por una descarga directa

$I_o$ : Pico de corriente de Rayo [kA]

$ha$ : Altura promedio de la línea con respecto al nivel de la tierra [m]

$y_{min}$ : Distancia entre la descarga directa y la línea [m]

$r_s$ : Distancia de la descarga con respecto al conductor [m]

$r_g$ : Distancia de la descarga a tierra [m]

$$I_o = 27,7 \text{ [kA]}$$

$$ha = 12 \text{ [m]}$$

$$r_s = 10 * I_o^{0,65}$$

$$r_s = 86,6187 \text{ [m]}$$

$$r_g = 0,9 * r_s$$

$$r_g = 77,9568 \text{ [m]}$$

$$y_{min} = \sqrt{r_s^2 - (r_g - ha)^2}$$

$$y_{min} = 56,1471 \text{ [min]}$$

$$V_{max} = 38,8 * I_o * \frac{ha}{y_{min}}$$

$$V_{max} = 229,7023 \text{ [kV]}$$

Finalmente, para el presente caso de estudio se toma el sobrevoltaje por impacto directo 229,7 [kV], el cual servirá como referencia al voltaje máximo que soportará la red, ahora se procede con el desarrollo esquemático mediante bloques de modelamiento en Simulink, en el cual se pueden

visualizar valores de cada uno de los parámetros de la ecuación tales como: el voltaje máximo, el signo (descarga positiva o negativa), la tabla de valores que representa la forma de la onda en el dominio del tiempo, voltaje RMS de la red, la frecuencia, entre los más importantes; para así poder analizar el comportamiento del mismo en diferentes escenarios.

#### **4.4. Línea de subtransmisión San Rafael-Mulalo**

Primero se presenta un diagrama unifilar general de toda el área de concesión de ELEPCO S.A., esto ayudará para la identificación parcial y total del área de estudio, en el Anexo 1 se puede apreciar las líneas a voltaje de diferentes colores esto como parte de la identificación de los diferentes valores de voltaje que se trabaja en las líneas, teniendo estas las siguientes ponderaciones, el amarillo 138 [kV], el rojo 69 [kV], el verde 13,8 [kV] y el azul 6,9 [kV].

En la Figura 10 se puede visualizar el área de trabajo, la cual está compuesta por la línea de subtransmisión de 69 [kV], la misma que conecta a la subestación de San Rafael y Mulalo, dicha línea de subtransmisión abarca una extensión de 18,33 [km], de la que se tomaron datos tales como el voltaje de trabajo, el calibre del conductor como también las distancias que se tienen a lo largo de toda la línea.



**Figura 10 Diagrama Unifilar San Rafael-Mulalo**

#### 4.5. Descripción de los esquemas de protección de la línea

En el Anexo 2, se presenta un diagrama unifilar donde constan las protecciones y las ubicaciones de las mismas a lo largo de la línea de subtransmisión, esto con la finalidad de conocer

En la Tabla 10 se detalla las protecciones, ubicación, marca y fabricante de cada una de las protecciones que figuran en el Anexo 2, cabe recalcar que las protecciones mencionadas son de las líneas ya que nuestro análisis se enfoca en la línea de subtransmisión de 69 [kV], también se presenta la nomenclatura de los elementos para poder facilitar su ubicación y sobre todo la identificación de dichos elementos.

**Tabla 10****Características de protecciones**

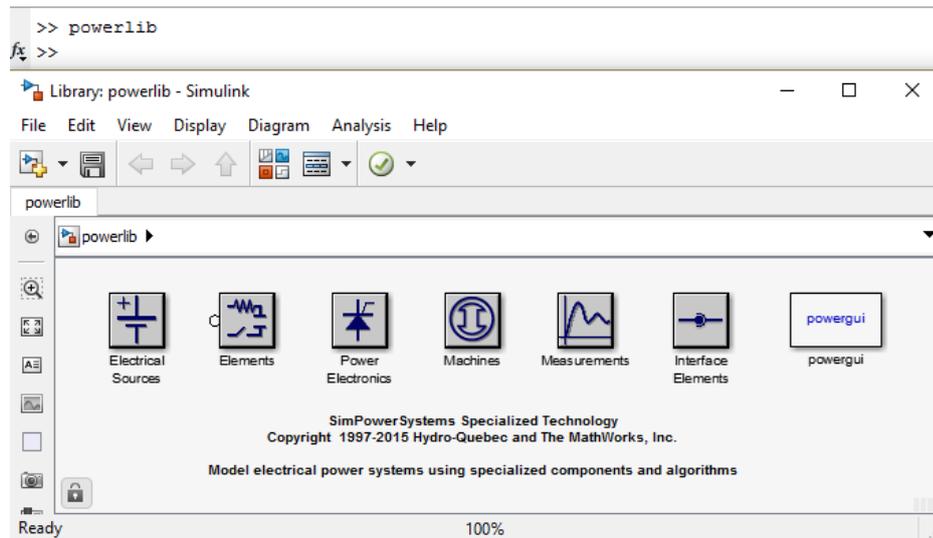
SUBESTACIÓN	RELE	TIPO	TC	DELAY TIME	MARCA	NOMENCLATURA
C.R.S.	50/51	DPU	30/5	0,02	ABB	52CRS9-T1
	50/51 N	2000R		0,01		
C.R.S.	50/51	DPU	50/5	0,12	ABB	52CRS9-L1
	50/51 N	2000R		0,11		
SAN RAFAEL	50/51	GE 650	300/ 5	NA	GENERAL ELECTRIC	52R9-L2
	50/51 N			NA		
SAN RAFAEL	50/51	REF 615	800/ 5	NA	ABB	52R8-T1
	50/51 N			NA		
MULALO	50/51	CR-9	600/ 5	NA	MITSUBISHI	52M9-L1
	50/51 N			NA		
MULALO	50/51	CO-8	800/ 5	NA	MITSUBISHI	52M8-T1
	50/51 N			NA		

**4.6. Desarrollo del modelamiento**

A continuación, se explicarán las variables que se han utilizado en la modelación de bloques mediante la utilización de Simulink.

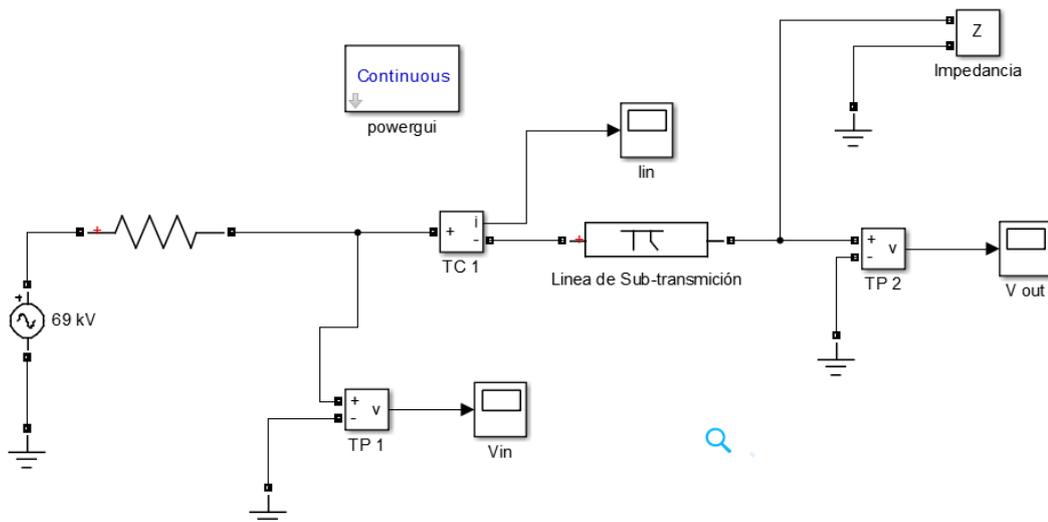
**4.6.1. Descripción de las variables incluidas en el modelamiento**

Lo primero que se realiza es la llamada a una librería en Matlab la cual permitirá el manejo fácil de elementos de potencia con la finalidad de tener un diagrama más compacto con una respuesta de tiempo real, como se aprecia en la Figura 11.



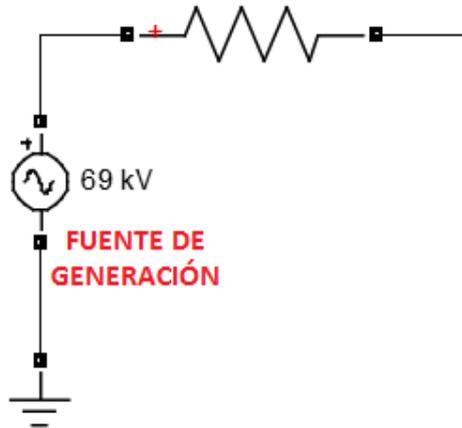
**Figura 11 Interfaz de PowerLib**

Luego se procede con la realización de un documento nuevo en el cual se encontrarán las diferentes variables que se necesitarán en la simulación, como se muestra en la Figura 12.



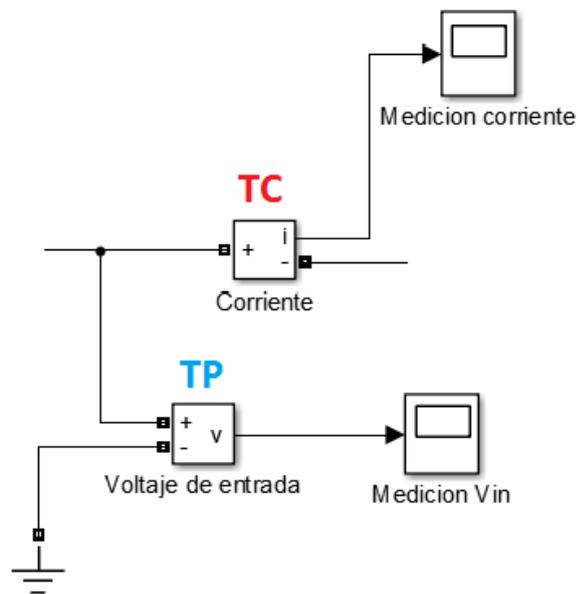
**Figura 12 Modelación de línea de subtransmisión en Simulink**

En la Figura 13 se muestra los primeros elementos de la simulación de bloques, la fuente de 69 [kV] la cual permite el manejo el voltaje de trabajo para nuestra simulación, la resistencia la cual ayuda a limitar el paso de corriente del impulso de rayo y sobre todo hacer una referencia a la resistencia de los elementos conectados.



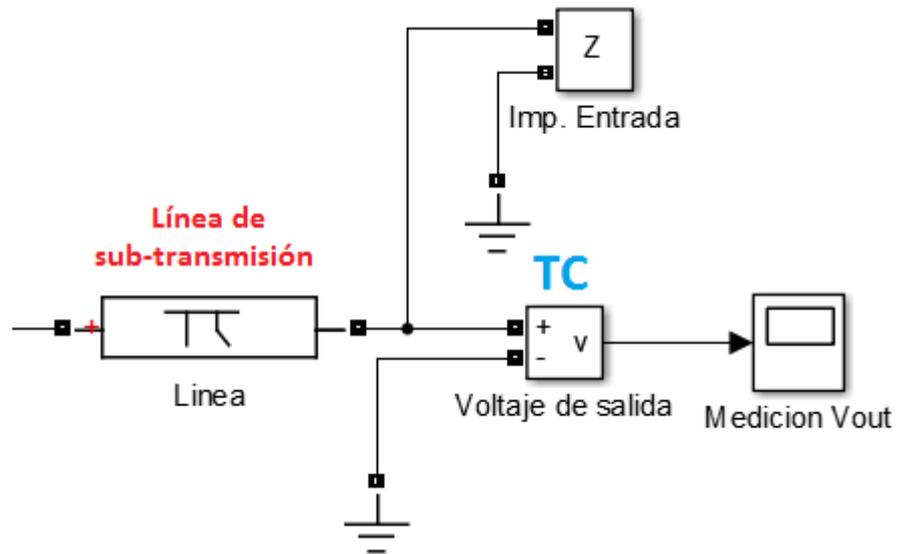
**Figura 13 Descripción Parte 1**

En la Figura 14 se pueden apreciar instrumentos de medición los cuales ayudan con la visualización de los valores que se obtendrán después de aplicar el impulso del Rayo, en esta parte de la simulación se han utilizado TC y TP para poder sacar los datos de corriente y voltaje antes de la línea de subtransmisión.



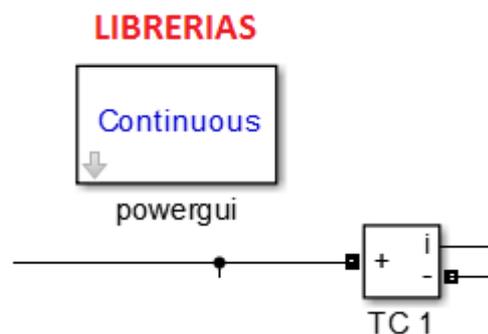
**Figura 14 Descripción Parte 2**

En la Figura 15 se puede apreciar la línea de subtransmisión más un TC el cual ayudará con la visualización del voltaje de la línea de subtransmisión a la salida, además, se cuenta con un medidor de impedancia, con la finalidad de observar los cambios y variaciones en la frecuencia.



**Figura 15 Descripción Parte 3**

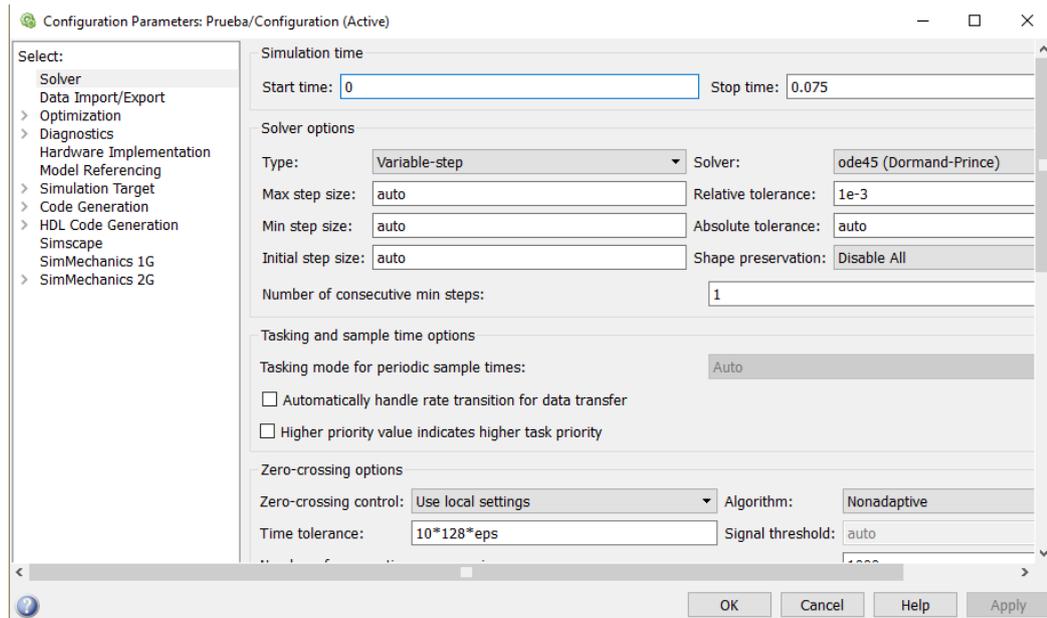
Por último, en la Figura 16 se puede evidenciar el bloque de PowerGui la cual ayuda con el llamado, utilización y compilación de las diferentes librerías que se utilizan en la presente simulación, esto ayudará con la actualización y el manejo de las variables presentadas con anterioridad.



**Figura 16 Descripción Parte 4**

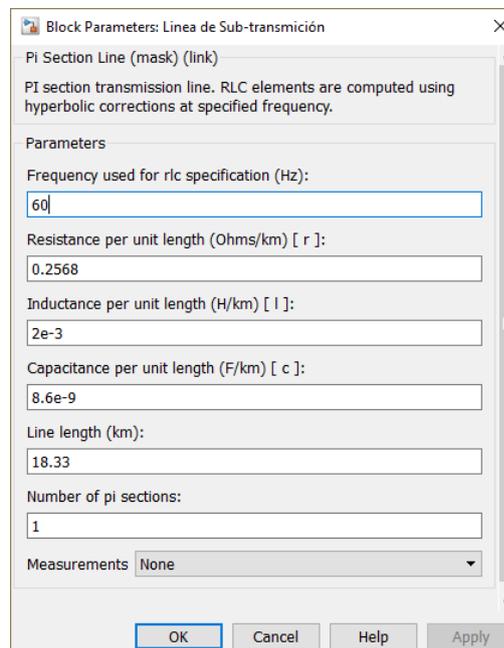
#### 4.6.2. Simulación mediante Simulink

En la Figura 17 se puede apreciar la configuración de los parámetros necesarios para la simulación, tales como tiempo de inicio, tiempo final y los pasos de tiempo necesarios durante la simulación para la correcta visualización de los resultados y las gráficas que se expondrán.



**Figura 17 Ventana de configuración de parámetros**

Los parámetros presentados en la Figura 17 son los que se han aplicado en la presente simulación, esto debido a que los tiempos manejados muestran un resultado más interactivo.

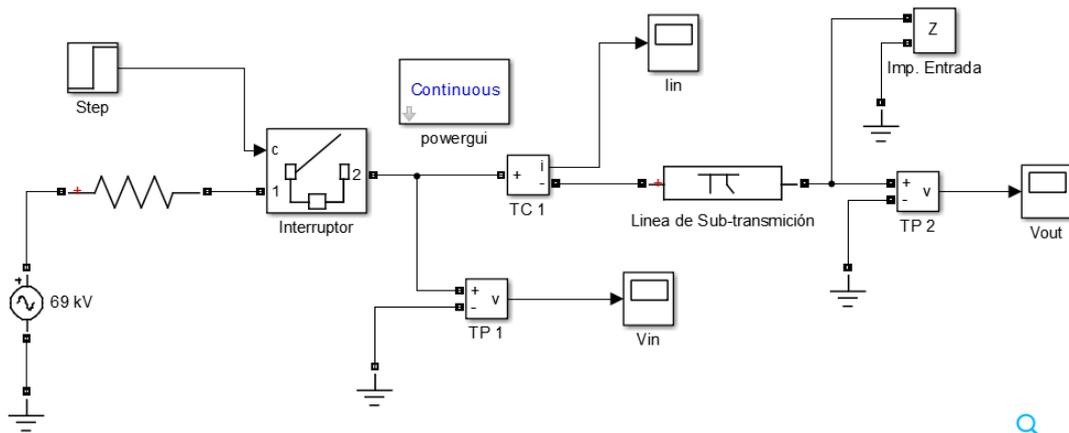


**Figura 18 Datos de la línea de subtransmisión**

En la Figura 18 se observa los datos que se han ingresado en el cuadro de diálogo de la línea de subtransmisión, dichos datos son correspondientes al tipo de cable, longitud y voltaje por el cual se transmite, dichos datos se encuentran en el Anexo 3.

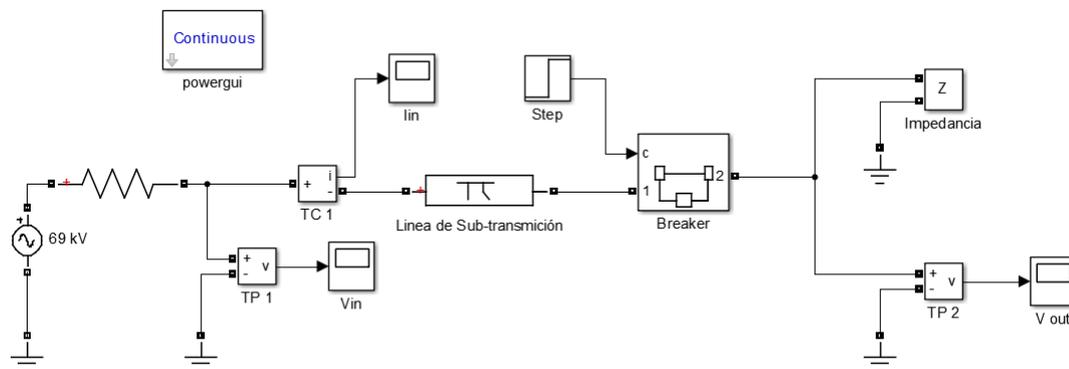
### 4.6.3. Aplicación de sobrevoltajes en puntos críticos

A continuación, se va a presentar la aplicación de sobrevoltajes en los puntos que más susceptibilidad tienen en el tramo de la línea de subtransmisión de 69 [kV], esto con la finalidad de obtener datos que ayuden a obtener una mejor conclusión y sobre todo reconocer puntos que son afectados por las descargas atmosféricas.



**Figura 19 Aplicación de sobrevoltajes en punto crítico 1**

En la Figura 19 se puede apreciar un punto crítico, el cual es el inicio del sistema, este de acuerdo a las características de la línea será distribuido en todo el tramo, lo cual servirá para verificar cual es el sobrevoltaje máximo que está circulando por la línea, como también, la variación de la corriente y la frecuencia al aplicar dicho sobrevoltaje.



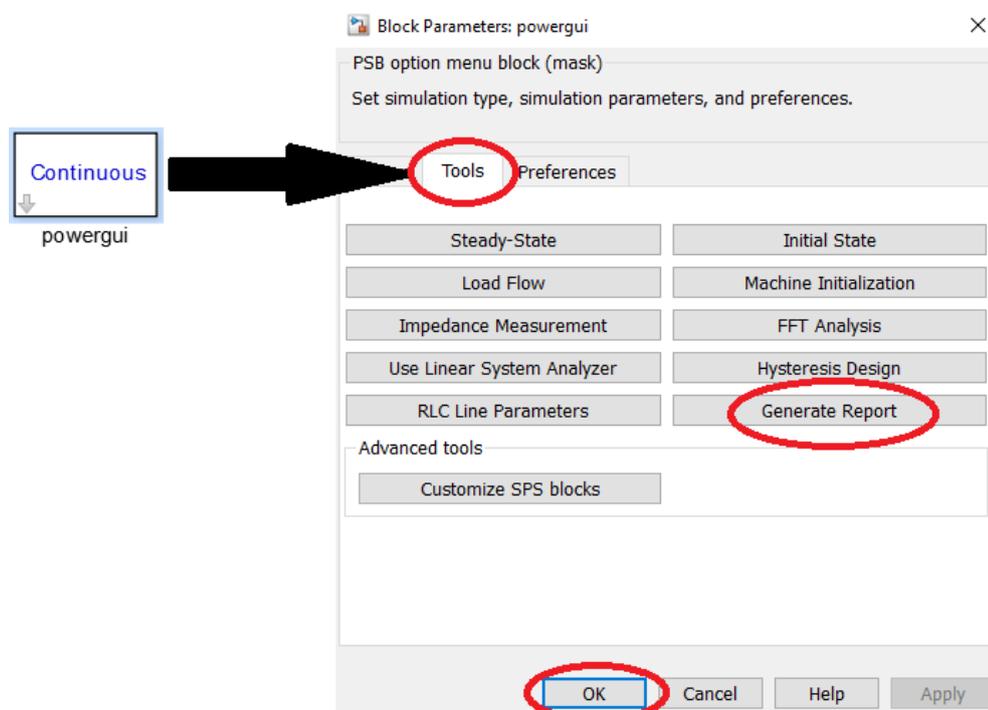
**Figura 20 Aplicación de sobrevoltajes punto crítico 2**

En la Figura 20, la aplicación de sobrevoltajes hace referencia al interior y fuera de la línea de subtransmisión, esto para analizar las variaciones de

voltaje, de corriente y de frecuencia de ser el caso, con la finalidad de observar los resultados que se obtienen en este punto, a más de ello se aprecia el impulso de la descarga esto para determinar los tiempos de respuesta y con esto comparar los tiempos obtenidos en la simulación con los de los datos proporcionados por ELEPCO S.A.

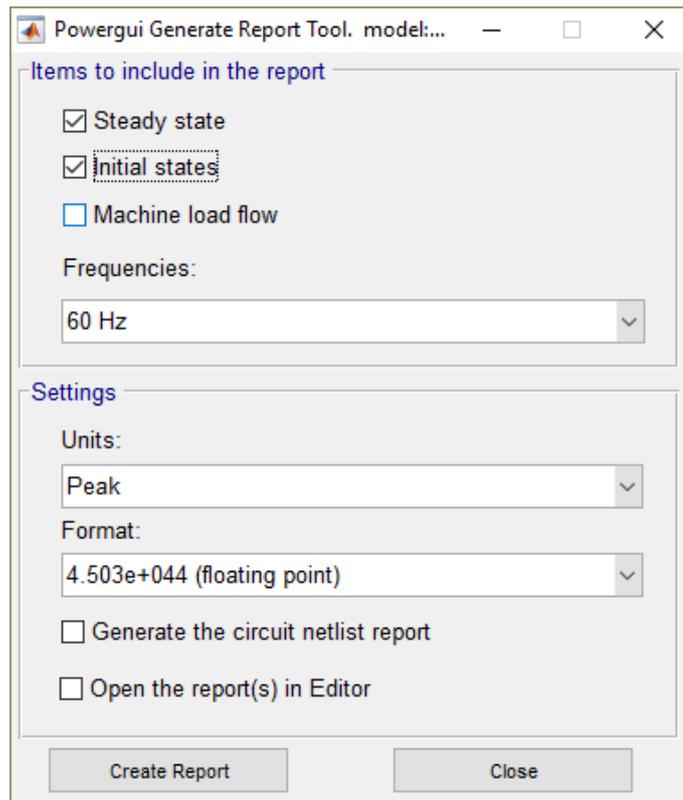
#### 4.6.4. Obtención de datos

Se puede generar un informe que facilita los datos que pueden ser útiles, la información que se presenta son voltajes, corrientes, tiempos y temperaturas, las cuales ayudan para manejo de los resultados que se requieren.



**Figura 21 Pasos para generación de reporte**

En la Figura 21 se puede visualizar los pasos para poder generar un reporte el cual se lo puede editar dependiendo de los datos que se necesite visualizar.



**Figura 22 Datos para generación de reporte**

En la Figura 22 se observa los parámetros escogidos con la finalidad de obtener un reporte resumido, tanto de los elementos de medición como los elementos del presente análisis.

En el Anexo 4 se observa los datos obtenidos, tales como, voltaje, corriente en estado estable y los voltajes y corrientes en estados no lineales o transitorios, además, se obtienen los datos de temperatura de los elementos de medición.

En el reporte generado también se puede observar datos por instrumentos de medidas, es decir, por nombre de cada bloque creado, esto con la finalidad de tener una mejor visión de cada uno de los mencionados instrumentos y sobre todo para un mejor control de los tiempos y datos generados.

Además de los datos obtenidos en el reporte también se tiene graficas tanto de corrientes, voltajes a la entrada y salida de la línea de subtransmisión, dichas graficas ayudará a verificar que el valor de la corriente que se aplica en las simulaciones sea la correcta y con esto podemos visualizar el valor del voltaje que se obtiene en la línea.

## 4.7. Discusión de los resultados

### 4.7.1. Análisis de corrientes obtenidas

A continuación, se visualizan las corrientes obtenidas, dichos datos se podrán visualizar en los SCOPE que se encuentran a la entrada y a la salida de la línea de subtransmisión.

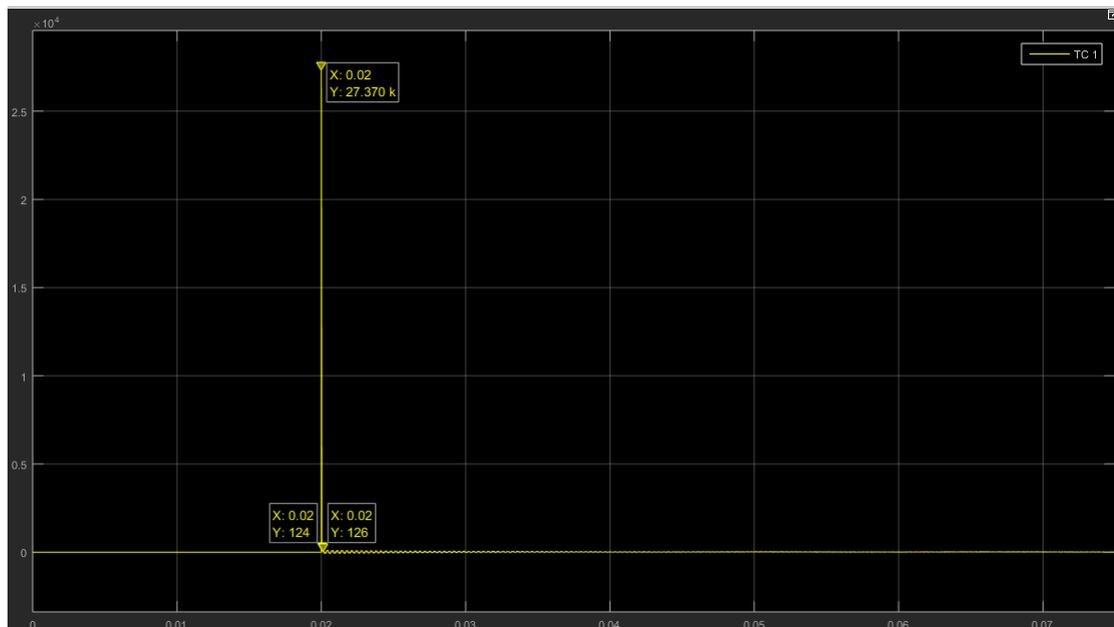
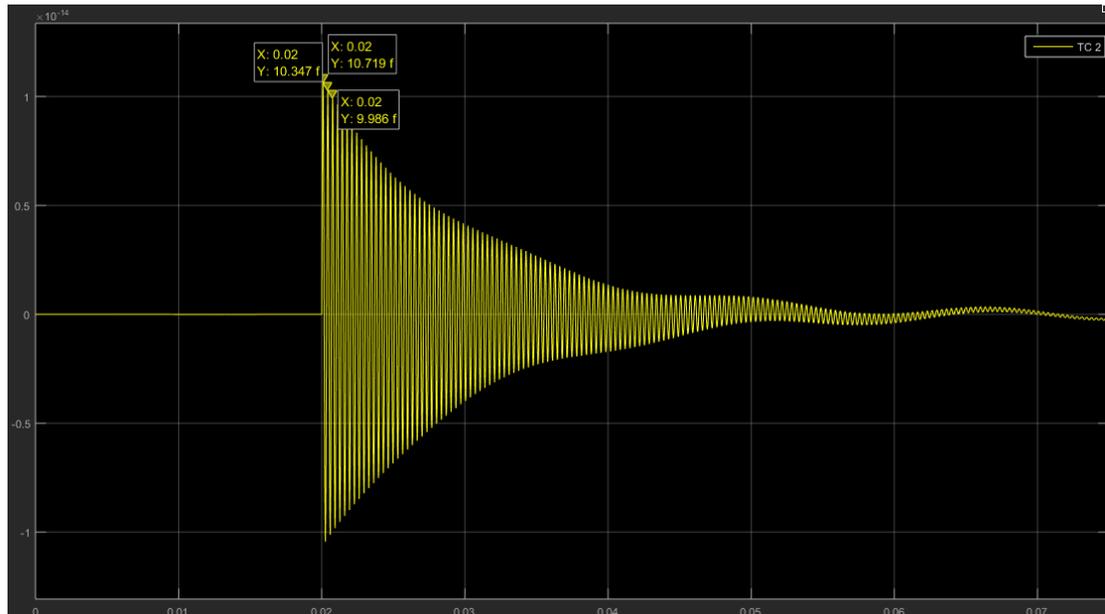


Figura 23 Corriente de entrada a la línea de subtransmisión

Peak Finder		
Settings		
Peaks		
	Value	Time
<input type="checkbox"/>	27.370 k	0.020
<input type="checkbox"/>	125.884	0.020
<input type="checkbox"/>	124.446	0.020

Figura 24 Valor de la corriente de entrada

En la Figura 23 y 24 se observa el impulso de la corriente de la entrada, la cual es el resultado de la descarga atmosférica producida en la línea de 69 [kV], se visualiza que es de 27,37 [kA] tanto el pico como el valor que da como resultado en la simulación, además aprecia el intervalo de tiempo que es de 0,02 [seg] por el cual esta funciona hasta estabilizar su valor.



**Figura 25 Corriente de salida de la línea de transmisión**

Signal Statistics		
	Value	Time
Max	10.719 f	0.020
Min	-10.433 f	0.020
Peak to Peak	21.152 f	
Mean	53.132 z	
Median	3.701 a	
RMS	2.326 f	

**Figura 26 Valor de la corriente de salida**

En la Figura 25 y 26 se observa la corriente circulando en la línea cuyo valor es de 10,719 [f] lo que a las medidas reales es 1,0719 [kA], además se puede ver el tiempo en que dura el máximo pico e corriente siendo este 0,02 [seg]. Con esto se puede manejar una comparación entre los datos obtenidos en la situación y los datos reales de los equipos de protección para observar si en dicho tiempo existirá un corte debido a la actuación de las protecciones.

#### 4.7.2. Determinación de los puntos afectados

Según los datos obtenidos en el análisis de los puntos críticos, se concluye que el punto el cual es el más afectado en esta simulación es antes de la línea de subtransmisión, ya que como se mencionó con anterioridad al aplicar fuera de la línea un sobre voltaje no afecta al funcionamiento de la línea ni a la actuación de las protecciones.

Además de la situación de la línea se puede

$$R = \frac{V}{I}$$

$$R = \frac{131,787 \times 10^3 [V]}{1,0719 \times 10^3 [A]}$$

$$R = 122,9471 [\Omega]$$

Realizando el análisis de la resistencia de puesta a tierra se obtuvo un valor de 122,9471  $[\Omega]$ , con esto se pudo concluir bajo los parámetros de la simulación que el estado actual del sistema de puesta a tierra que se tiene en todo el tramo de la línea de subtransmisión no es buena.

#### 4.7.3. Diagnóstico de la situación actual de las líneas

A lo largo de la línea de subtransmisión de 69  $[kV]$ , la cual se ubica a lo largo de San Rafael-Mulalo, se han tomado datos los cuales sirven para verificar el estado de las líneas, además de, el estado del sistema de puesta a tierra que tiene esta línea de subtransmisión.



**Figura 27 Tensor suelto**

La Figura 27, cuya ubicación es en el sector de Loma grande, en la cual se han presentado los defectos que se pueden observar en las Figuras, se tiene que la resistencia medida es de 35  $[\Omega]$ , es decir, que sobrepasa las medidas que debe tener, teniendo como resultado un sistema de puesta a tierra en mal estado.

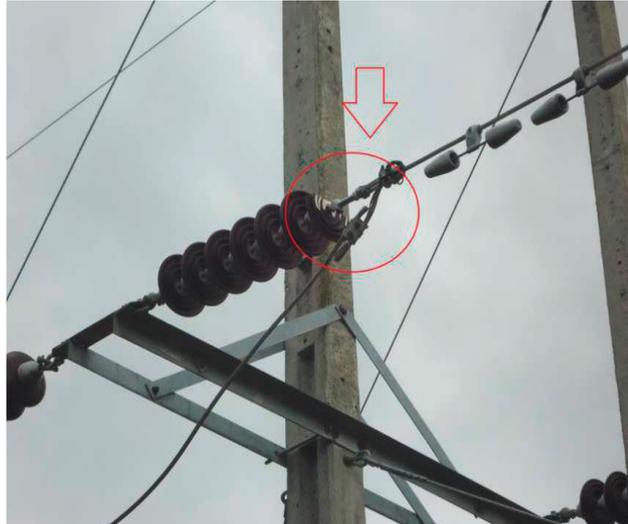


**Figura 28 Puesta a tierra obstruida**



**Figura 29 Medición de puesta a tierra**

El siguiente dato se lo ha tomado de Loma El Calvario, en la Figura 29 se puede observar un terminal sulfatado, lo que impide una buena medida del sistema de puesta a tierra, como medida del sistema de puesta a tierra se obtiene un resultado de  $117,4 [\Omega]$ , de igual manera sobrepasa la medida que debe tener un sistema de puesta a tierra.



**Figura 30 Aislador de suspensión roto**

En Loma el Calvario de Brazales en la Figura 30, se ha encontrado deficiencias, tales como, aislador de suspensión roto, tensor a tierra suelto. El resultado de medición del sistema de puesta a tierra un valor de  $49,6 [\Omega]$ , lo que muestra que esta fuera de los estándares de normalización.

A continuación, se presenta una tabla en la cual se recopilan datos de medición de tierra de los lugares más relevantes, los cuales ayudan a definir el estado actual de la línea de subtransmisión de  $69 [kV]$ .

En la Tabla 11 se pueden observar los problemas que se tiene en los diferentes puntos a lo largo de la línea de subtransmisión, estos problemas son efecto de la antigüedad de los postes, de las varillas y de los elementos de conexión que se utilizan en la línea de  $69 [kV]$ .

Según los datos recopilados la línea de subtransmisión San Rafael–Mulalo tiene una antigüedad de un promedio de 20 años lo cual influye en el deterioro de los diferentes elementos de la misma, además de que las áreas en donde están ubicadas necesita mantenimiento y recuperación de la puesta a tierra.

Tabla 11

## Datos de puesta a tierra

Ubicación	Medición [ $\Omega$ ]	Problema
<b>Loma Grande</b>	35	Tensor suelto.
<b>Loma Grande</b>	117,4	Conexión floja del chicote de puesta a tierra. No se respeta la franja de seguridad.
<b>Loma el Calvario de Brazales</b>	49,6	Templador suelto del tensor. Aislador de suspensión roto.
<b>Calle 10 de Agosto</b>	22,4	Templador suelto del tensor. Aislador de suspensión roto.
<b>Tras del Mercado Mayorista</b>	15,53	Conector sulfatado.
<b>Laygua de Santo Domingo</b>	101,2	Conector sulfatado.
<b>Laygua de Santo Domingo</b>	190,1	Conector sulfatado.

Para definir el estado actual de la línea de subtransmisión se procedió con la realización de un promedio de las diferentes mediciones realizadas.

$$R_T = \frac{35 + 117,4 + 49,6 + 22,4 + 15,53 + 101,2 + 190,1}{7}$$

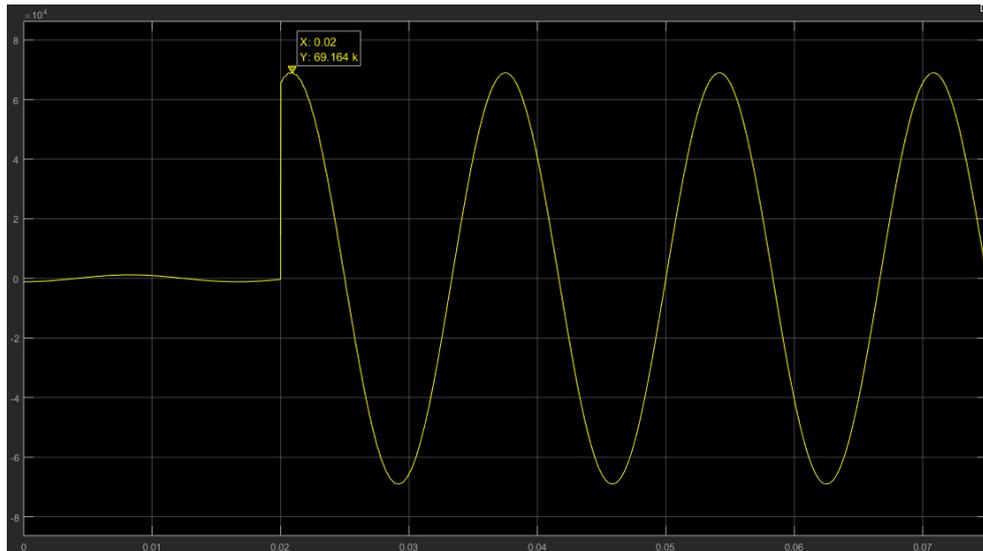
$$R_T = \frac{531,23}{7}$$

$$R_T = 75,89 [\Omega]$$

Según la norma IEC 60364-4-442, el valor del sistema de puesta a tierra no debe sobrepasar los 10 [ $\Omega$ ], según los datos recolectados el valor de la resistencia contra rayos a lo largo de la línea es de 75,89 [ $\Omega$ ], dando como resultado un sistema en mal estado el cual afecta al funcionamiento tanto de las protecciones como de la misma línea estos datos se aproximan a los obtenidos en la simulación cuyo valor fue de 120 [ $\Omega$ ].

#### 4.7.4. Efectos de los sobre voltajes aplicados en diferentes puntos

En esta sección se presentan los datos en función del voltaje, los cuales se han aplicado a lo largo de la línea de subtransmisión, que facilitará la observación de los fenómenos diferentes que se pueden dar al variar los voltajes y los puntos de aplicación de los mismos. En primer lugar, se analiza la aplicación de un sobrevoltaje en la línea directamente, por lo que se observa el voltaje de ingreso.



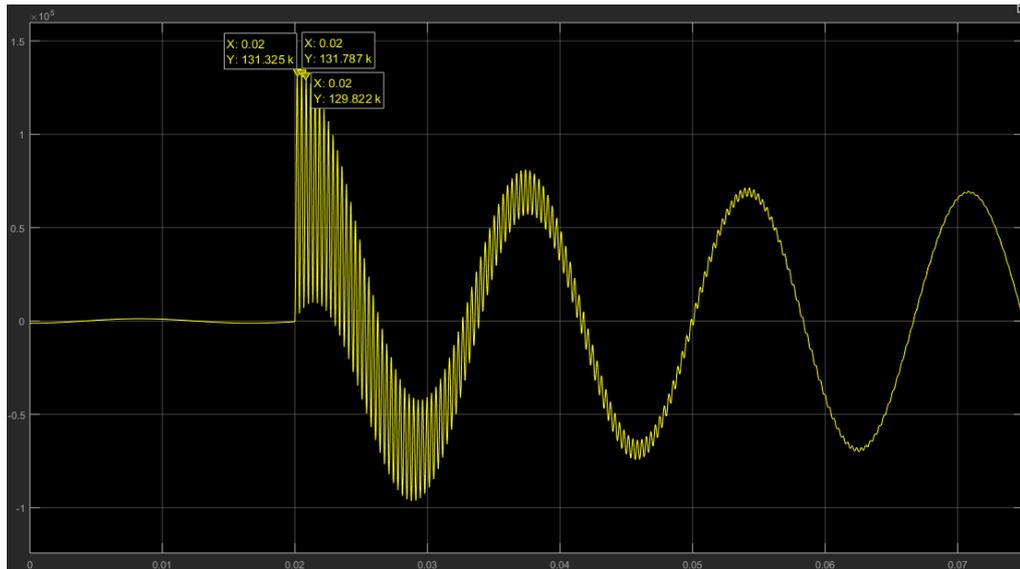
**Figura 31 Voltaje de la línea de subtransmisión**

En la Figura 31 se puede apreciar el voltaje con el cual se trabaja en la línea de subtransmisión, siendo este 69 [kV], más adelante se observa el fenómeno que interfiere o que se produce a la salida de la misma línea.

El mismo voltaje se presentará en el segundo caso, ya que es la misma línea con las mismas características, lo diferente en este caso sería la aplicación, este se toma en un caso externo a la línea de subtransmisión.

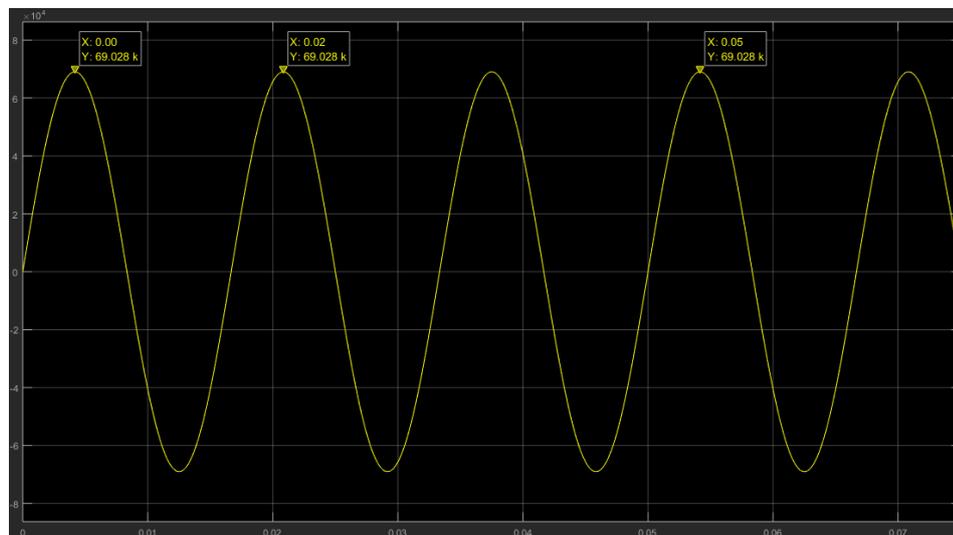
#### **4.7.5. Observación del fenómeno**

Como ya se indicó en el punto anterior se procederá con la observación del fenómeno producido por los sobrevoltajes en dos puntos específicos, el primero en la línea y el segundo fuera de la línea, esto con la finalidad de visualizar cuál de estos sería el que más afectación tiene sobre la línea de subtransmisión.



**Figura 32 Salida de Voltaje del primer punto**

Como se puede observar en la Figura 32, se obtiene varios valores de ruidos eléctricos los cuales interfieren con el funcionamiento correcto de la línea, es decir, en este punto lo que se puede determinar es una actuación de protecciones debido al tiempo de duración de estas perturbaciones.



**Figura 33 Salida de Voltaje del segundo punto**

En la Figura 33 se puede observar que la aplicación de un sobre voltaje a un punto externo a la línea no influye en el funcionamiento de la que está en estudio, esto debido a que cada línea tiene sus protecciones las cuales funcionarían en los distintos casos de emergencia.

#### 4.8. Descripción de los resultados obtenidos

Según los anteriores puntos se ha verificado que uno de los factores que mayormente influye en este análisis es el sistema de puesta a tierra, como ya se pudo ver, a lo largo de la línea de subtransmisión se han podido recolectar datos los cuales aseveran la conclusión.

Los datos que se han obtenido acerca de las corrientes aplicadas en la línea de subtransmisión, reflejan el daño que puede causar la misma a lo largo de la línea, esto sin duda proporciona datos con los cuales se pueden trabajar para realizar un análisis de protecciones, y así determinar si las mismas funcionan de manera adecuada.

En el Anexo 2 se observa las características de las protecciones, además de visualizar los tiempos en los que estas pueden actuar, a continuación, se procederá a resumir las protecciones más importantes, en las cuales se puede ver los tiempos de actuación y también comparar con los tiempos obtenidos en la simulación.

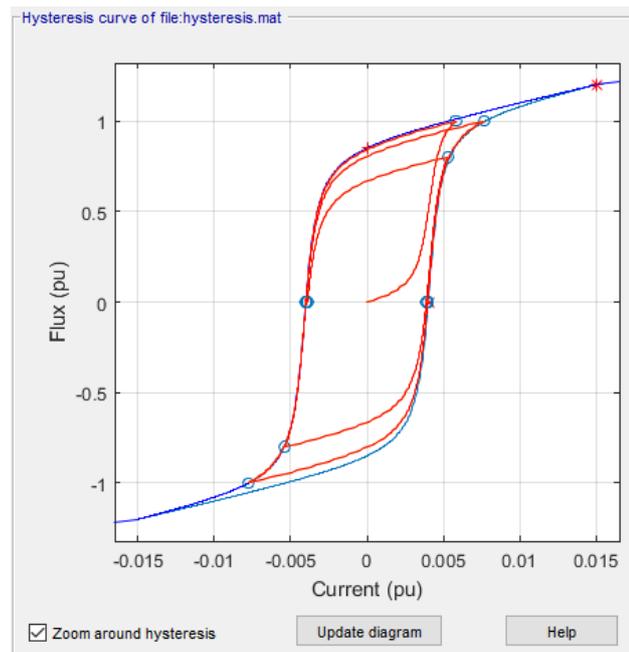
**Tabla 12**

#### Coordinación de protecciones ELEPCO S.A.

ELEMENTO PROTEGIDO	INTERRUPTOR	RTC	PROTECCION DE FASE			PROTECCION DE TIERRA		
			Pick up I>	Dial Time	Tipo de Curva	Pick up I>	Dial Time	Tipo de Curva
LT SAN RAFAEL	52M9-L1	600/5	2	4	CR-9	1	5	CR-9
LT CRS	52CRS9-L1	50/5	3,7	2,7	ANSI MUY INVERSA	0,6	0,2	TIEMPO DEFINIDO
TRANSFORMADOR 69kV	52CRS9-T1	30 /5	5,4	2	ANSI MUY INVERSA	1	0,1	TIEMPO DEFINIDO
LT PUJILÍ	52R9-L3	250/5	2	4	CO-9	1,5	3	CO-9
TRANSFORMADOR 69kV	52R9-L2	300/5	4	2,5	IAC EXT INVERSA	1,75	3	IAC MUY INVERSA

**Fuente:** ELEPCO S.A.

De acuerdo a los datos mencionados en la Tabla 12, se procede a la comparación con los resultados obtenidos en el Software, para eso se utilizarán los tiempos que reflejan en la tabla anterior.



**Figura 34 Curva de protecciones de la simulación**

Como se observa en la Figura 34, las protecciones tienden a actuar en cortos espacios de tiempo, manteniéndose en los límites de frontera, bajo estas condiciones produce que los equipos tiendan a fallar en el momento que actúan, o también puede generar datos erróneos.

#### **4.8.1. Análisis de los índices de calidad del servicio eléctrico FMIK y TTIK**

Con los datos reflejados en la Tabla 13 se toman en consideración los índices de calidad técnicos con la finalidad de comprobar las mismas con la actualidad de ELEPCO S.A.

Al comparar estos datos con la Tabla 3, se obtiene que bajo las condiciones actuales los índices de calidad no son los mejores, es decir, al estar fuera del rango permitido, da a conocer que el estado del sistema de puesta a tierra no está en las mejores condiciones y siendo este sistema el que más influye al momento de la fuga de las corrientes a tierra, una por el tiempo en que deben durar las puestas a tierra para cambiarlas en su totalidad, o también por el sector en donde se encuentra, ya que por el desconocimiento de la población estas son obstruidas o son puestas al contacto de animales los cuales deterioran algún material del que es compuesto el sistema de puesta a tierra.

**Tabla 13**  
**Registros de Reclamos por Corte de Suministro de Energía**

AÑO	N° DE REPETICIONES	CAUSAS ESPECÍFICAS DE LA INTERRUPCIÓN	TIEMPO TOTAL DE INTERRUPCIÓN (Hr)
2016	374	RAMAS O ARBOL EN LA RED	126,18
2016	408	FUERTES VIENTOS	214,02
2016	395	SOBRECARGA	274,01
2016	265	DESCARGA ATMOSFERICA	335,47
2016	97	CHOQUE VEHICULO	212,21
2016	31	PERNOS FLOJOS U OXIDADOS	0,1
2016	896	CORTOCIRCUITO INTERNO	350,7
2016	2	MANTENIMIENTO RED	12
2016	25	OBJETO SOBRE LA LINEA	192,8
2016	3	APAGON GENERAL / SNI	14

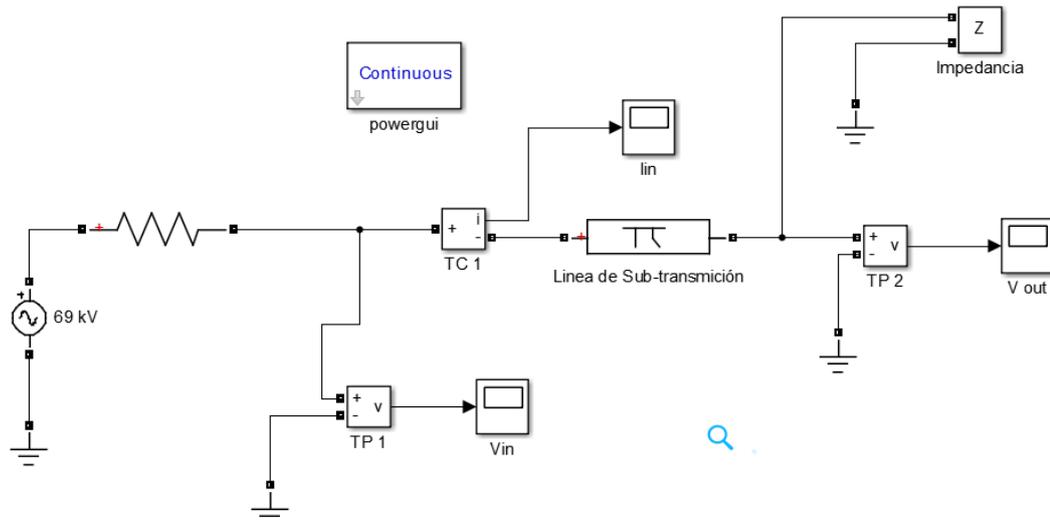
**Fuente:** ELEPCO S.A.

## CAPÍTULO V

### 5. PROPUESTA

#### 5.1. Datos informativos

Los datos que se han manejado a lo largo de la propuesta han sido, la corriente, el voltaje y la resistencia del sistema de puesta a tierra.



**Figura 35 Modelación de línea de subtransmisión en Simulink**

En la Figura 35 se puede observar que se mantiene la misma simulación, la variación se producirá en la resistencia del sistema de puesta a tierra, la cual va a ser de  $10 [\Omega]$ , basándonos en los factores o incidentes que se presentaron anteriormente con esta propuesta se verifica que al reducir los valores de la resistencia de puesta a tierra también se reducirán los tiempos de disipación, así como también se mejorarán los índices de calidad técnica.

#### 5.2. Antecedentes de la propuesta

En la tesis “MODELACIÓN DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA PARA EVALUACIÓN DE SOBRETENSIONES TRANSITORIAS” (Cuba, 2011). Previo la obtención del título de ingeniero eléctrico los autores, desarrollan una modelación de acuerdo a la normativa que se rige en el lugar con la finalidad de mostrar la incidencia que tienen los sobrevoltajes sobre las puestas a tierra.

Según el artículo “MODELACIÓN DE LÍNEAS AÉREAS DE TRANSMISIÓN PARA EL CÁLCULO DE SOBRETENSIONES ORIGINADAS POR EL RAYO” (2010). Se redacta un estudio de la influencia de los sistemas de puesta a tierra frente a descargas eléctricas además de calcular mediante modelaciones matemáticas los valores máximos que se pueden producir durante la descarga atmosférica.

### **5.3. Justificación**

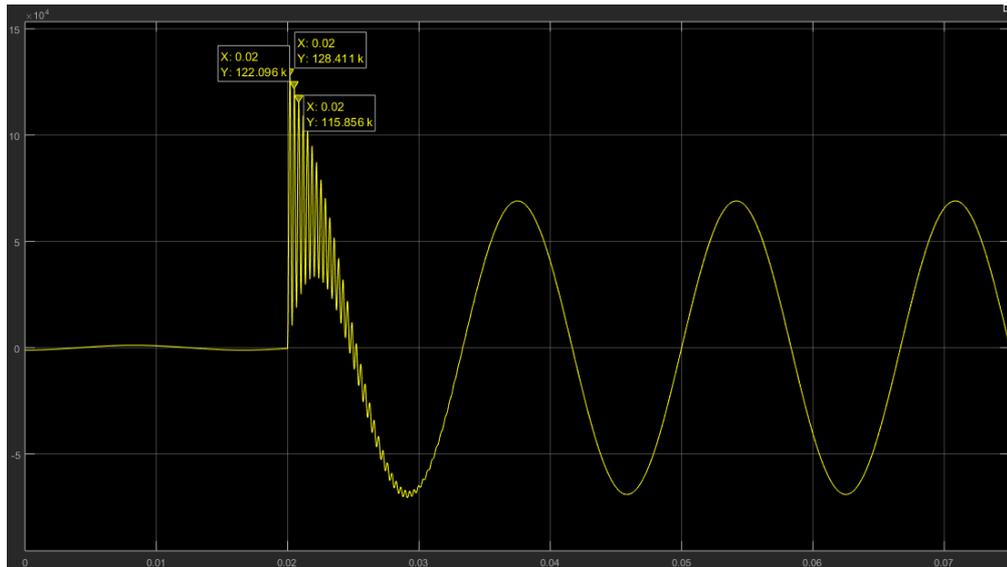
La presente propuesta busca realizar una mejora en los elementos del sistema de puesta a tierra de la línea de subtransmisión San Rafael-Mulalo con el fin de proporcionar la mayor calidad y sobre todo un mejor servicio en la entrega de energía eléctrica para la sociedad. Por tal razón, se reduce la resistencia del sistema de puesta a tierra a  $10 [\Omega]$  con la finalidad de obtener una mejora en los factores e índices de calidad técnica

### **5.4. Objetivo**

Reducir la resistencia del sistema de puesta a tierra a  $10 [\Omega]$  y analizar el comportamiento de los elementos de sobrecorriente asociados a los esquemas de conexión presente a lo largo de la línea de subtransmisión San Rafael-Mulalo de  $69 [kV]$ .

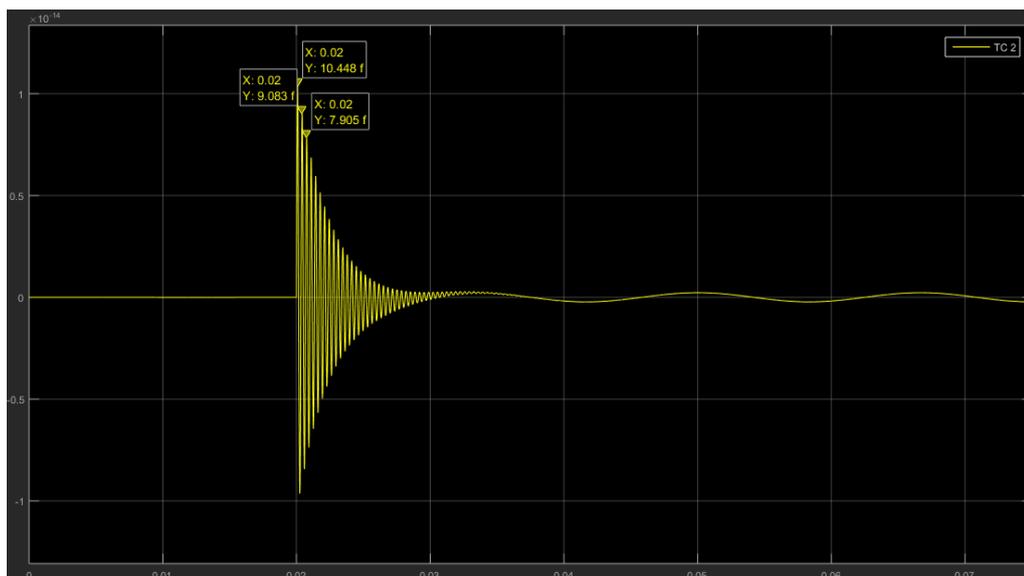
### **5.5. Fundamentación propuesta**

A continuación, se procede con una simulación, en la cual consta los valores nuevos del sistema de puesta a tierra tomando en consideración el modelo de la figura 35, cuyo valor nuevo propuesto para la simulación es  $10 [\Omega]$ , y se podrá observar los datos que se tiene a la salida.



**Figura 36 Voltaje de salida**

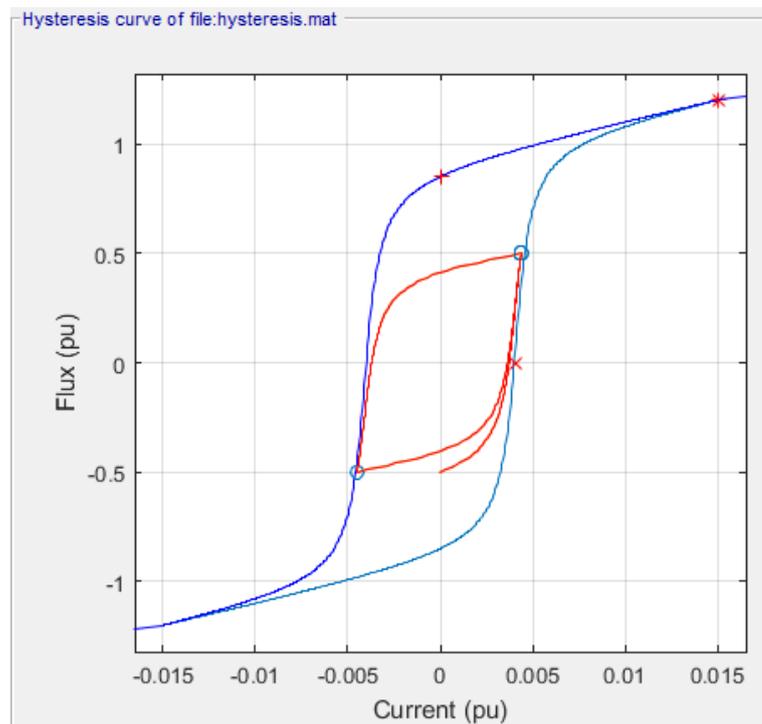
En la Figura 36, se observa el voltaje que se obtiene al aplicar el impulso de rayo tomando en consideración con una puesta a tierra de  $10 \text{ } [\Omega]$ , se puede visualizar el valor pico de voltaje se mantiene, siendo este  $128,411 \text{ } [kV]$ , la consideración importante que se obtiene en esta simulación es el tiempo de respuesta, siendo este  $0,01 \text{ } [seg]$ , el cual muestra que existe una disipación de corriente y voltaje por el sistema de puesta a tierra, con los datos obtenidos se puede establecer que al mejorar el sistema de puesta a tierra se pueden reducir los índices de calidad técnica.



**Figura 37 Corriente de salida**

Por último en la Figura 37, se obtuvo la corriente de salida la cual muestra una respuesta similar a la anterior, es decir, muestra una variación en el tiempo mas no en la amplitud, obteniendo como resultado una estabilización del sistema más eficaz y un tiempo de 0,01 [seg].

Al obtener los datos antes expuestos, se identifica que la calidad del sistema de puesta a tierra al ser mejorada se evitara datos erróneos y por ende una mejor calibración y actuación en las protecciones instaladas a lo largo de la línea de subtransmisión.



**Figura 38 Curva de protecciones de la simulación**

Como se observa en la Figura 38, después de realizar una nueva simulación la cual ha sido considerada con un valor de 10 [ $\Omega$ ] en el sistema de puesta a tierra, se han obtenido que los resultados para tiempo de coordinación de protecciones es más amplio el cual permitirá un mejor manejo en la actuación de las mismas con la finalidad de evitar funcionamientos erróneos.

## 5.6. Comprobación de hipótesis

**Hipótesis:** “Con el análisis y evaluación de los esquemas de conexión de los elementos del sistema de puesta a tierra se podrá determinar el efecto que tiene en los índices de calidad y el índice de interrupción, en sí la calidad en el suministro de energía.”

En la actualidad el sistema de puesta a tierra a lo largo de la línea de subtransmisión de 69 [kV] San Rafael-Mulalo se encuentra en un rango de 75,89 [ $\Omega$ ], lo que permite determinar que al encontrarse fuera del rango de tolerancia de 10 [ $\Omega$ ] no se encuentra en un buen estado y tampoco llega a disipar en totalidad las corrientes de las descargas atmosféricas que se producen a lo largo de la misma.

Según los datos obtenidos en la simulación se pudo determinar que los tiempos en los que se debe disipar tanto la sobre corriente como el sobrevoltaje que se produzcan, son muy altos lo cual influirá en una descoordinación de protecciones o a mantener un remanente el cual impida la actuación de las protecciones en un tiempo establecido y produzca saltos inesperados o un mal funcionamiento de las mismas.

En el presente caso de estudio se ha analizado la influencia de las descargas atmosféricas y el estado del sistema de puesta a tierra frente a los factores de calidad que se deben brindar a los consumidores de la energía eléctrica, además de que se ha procedido con la recolección de datos lo que ha permitido realizar una simulación, la cual, con valores reales se ha podido establecer si estos casos son influyentes en gran manera para la obtención o actuación de las protecciones.

Como se ha podido observar en los puntos anteriores al aplicar la descarga atmosférica en la línea de subtransmisión se ha obtenido, que, la misma se disipa en 0,07 [seg] lo cual dice, que el sistema de puesta a tierra es el más influyente en este caso, ya que, si está bien las sobre corrientes y sobrevoltajes se disiparían en menor tiempo y no involucrarían a la actuación de las protecciones lo que permitirá contar con un servicio ininterrumpido y así mejorar o reducir los factores de calidad técnica.

Para concluir, si se aplica un mantenimiento predictivo correctivo en las diferentes puestas de tierra de la línea de subtransmisión y se reduce la resistencia de las mismas a  $10 [\Omega]$  se obtiene un mejor resultado en la disipación de los sobrevoltajes y sobre corrientes, dejando un tiempo de  $0,01 [seg]$ , lo que un mejor manejo en la calibración de las protecciones para evitar desconexiones accidentales y sobre todo una reducción en los factores de calidad.

## CONCLUSIONES

- Se realizó un estudio de los esquemas de conexión de los sistemas de puesta a tierra en la línea de subtransmisión San Rafael-Mulalo, mediante una investigación de campo se aprecia que posee un promedio de  $75,89 [\Omega]$ , los mismos que se encuentran fuera de un rango normalizado el cual es de  $10 [\Omega]$ , así como también, los índices de calidad FMIK y TTIK se encuentran en 7,3 y 5,2 respectivamente.
- El análisis del comportamiento bajo las condiciones actuales del sistema frente a una descarga atmosférica permite un impulso de rayo de  $27,37 [kA]$ , dando como resultado un tiempo de estabilización de  $0,07 [seg]$ . Con estas consideraciones actuales del sistema de puesta a tierra existe una actuación de protecciones fuera de tiempo.
- El análisis del comportamiento de acuerdo a la curva de histéresis se observa que el sistema actual se encuentra en los límites de frontera permitiendo actuaciones de elementos de manera errónea. Con este análisis se determina que el tiempo real al cual las protecciones están sincronizadas es de  $0,02 [seg]$ , mediante la simulación realizada se obtiene que el tiempo que se demora la falla es de  $0,07 [seg]$ , teniendo como resultado que las sobre-corrientes no se disipan por el sistema de puesta a tierra.
- Tomando en consideración un sistema de puesta a tierra de  $10 [\Omega]$ , el pico de corriente  $1,0448 [kA]$ , se permite una disipación en  $0,015 [seg]$  lo que permite definir que si existe una influencia en la estabilización del sistema. Con esta consideración se establece que se pueden mejorar los índices de calidad FMIK y TTIK regulados por el CONELEC.

## RECOMENDACIONES

- Es necesario realizar un análisis correctivo a la línea de subtransmisión, que permita determinar el funcionamiento y estado de los aisladores.
- Realizar inspecciones para verificar que las puestas a tierra a lo largo de la línea de subtransmisión de 69 [kV] se encuentren con una resistencia de puesta a tierra en los límites establecidos.
- Realizar un estudio de los registros estadísticos de las descargas atmosféricas en la zona de concesión de ELEPCO S.A., para determinar las características del rayo con mayor ocurrencia en esta zona, ya que los sistemas de puesta a tierra ubicados a lo largo de la línea no garantizan la protección de la misma para corrientes de descarga superiores a 27,7 [kA].

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arcioni, & Giménez. (Octubre de 2013). *Nota Técnica*. Recuperado el 17 de marzo del 2017. Obtenido de [http://www.editores-srl.com.ar/revistas/ie/281/arcioni\\_breve\\_rese%C3%B1a\\_de\\_los\\_fenomenos\\_fisicos\\_de\\_los\\_rayos](http://www.editores-srl.com.ar/revistas/ie/281/arcioni_breve_rese%C3%B1a_de_los_fenomenos_fisicos_de_los_rayos)
- ARCONEL 003/008. (2008). *Calidad del transporte de electricidad y del servicio de transmisión y conexión en el sistema nacional interconectado*. Quito: CONELEC.
- AUDOMAR, G. S., & BARTOLO., P. B. (30 de Abril de 2002). "*Estudio sobre protecciones contra descargas atmosféricas*". Veracruz, México, D.F.: Veracruz.
- Carlos Raúl, S. R. (2016). *Modelación en Matlab-Simulink del comportamiento transitorio de sistemas de puesta a tierra*. Las Villas.
- Francisco, A., & Verónica, A. (2012). *Estudio del comportamiento del sistema de protección de líneas de extra alta tensión ante defectos resistivos a tierra*. Uruguay.
- Hernan, C., & Rodmy, M. (2009). *Matlab en el análisis de sistemas de potencia*. La Paz: Universidad Mayor de San Andrés.
- Matlab: The language of technical computing. (2011). *Matlab: The language of technical computing*. Recuperado el 23 de abril del 2017. Obtenido de Matlab: The language of technical computing: <http://www.mathworks.com/help/toolbox/physmod/powersys/ref/distributedparameterline.html>
- NICOLAY, R. F., & EDUARDO, S. A. (Noviembre de 2011). "*Análisis y diagnóstico del sistema de subtransmisión a 69 kv, para la demanda actual y para la demanda proyectada al año 2020 en el área de concesión de la ELEPCO S.A.*". Latacunga, Cotopaxi, Ecuador.
- Preciado, & Echeverria. (2008). *Estudio de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad en Subestaciones del Sistema de Nacional de Transmisión*. Quito: Escuela Politecnica Nacional.

SCHNEIDER ELECTRIC. (2010). *Protecciones contra las sobretensiones*. Quito.

Turmero, P. (Agosto de 2011). *Monografias.com*. Recuperado el 24 de abril del 2017. Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos102/sistema-electrico-potencia/sistema-electrico-potencia.shtml>

VILLACRÉS, M. (Febrero de 2008). Adecuación del Sistema de Control, medida y protección de los alimentadores de la subestación San Rafael. Quito, Pichincha, Ecuador.

## **ANEXOS**



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA**

**CERTIFICACIÓN**

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por el señor:

**Javier Andrés Vique Quinde**

En la ciudad de Latacunga, a los 06 días del mes de noviembre del 2017.

Ing. Hernán Iturralde

**DIRECTOR DEL PROYECTO**

**Aprobado por:**

Ing. Katya Torres

**DIRECTORA DE CARRERA**

Dr. Rodrigo Vaca

**SECRETARIO ACADÉMICO**