



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

EXTENSIÓN LATACUNGA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN
ELECTROMECAÁNICA**

**ESTUDIO DE LOS ESQUEMAS DE CONEXIÓN DE LOS
ELEMENTOS DE PROTECCIÓN DE SOBREVOLTAJE DEL
ALIMENTADOR PILISHURCO, COMO UNA MEDIDA PARA
LA REDUCCIÓN DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD DEL
SERVICIO ELÉCTRICO FMIK (FRECUENCIA MEDIA) Y TTIK
(TIEMPO PROMEDIO) DE INTERRUPCIÓN DE LA EMPRESA
ELÉCTRICA AMBATO**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:
INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

SIOMARA LASTENIA REDROBÁN AMORES

Latacunga, Febrero de 2014

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
CERTIFICADO

ING. DIEGO ORTIZ (DIRECTOR)
ING. HERNÁN ITURRALDE (CODIRECTOR)

CERTIFICAN:

Que el trabajo titulado “**ESTUDIO DE LOS ESQUEMAS DE CONEXIÓN DE LOS ELEMENTOS DE PROTECCIÓN DE SOBREVOLTAJE DEL ALIMENTADOR PILISHURCO, COMO UNA MEDIDA PARA LA REDUCCIÓN DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD DEL SERVICIO ELÉCTRICO FMIK (FRECUENCIA MEDIA) Y TTIK (TIEMPO PROMEDIO) DE INTERRUPCIÓN DE LA EMPRESA ELÉCTRICA AMBATO**”, realizado por SIOMARA LASTENIA REDROBÁN AMORES, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la ESPE, en el Reglamento de Estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

Debido a que constituye un trabajo de excelente contenido científico que coadyuvará a la aplicación de conocimientos y al desarrollo profesional, se recomiendan su publicación.

El mencionado trabajo consta de UN empastado y UN disco compacto el cual contiene los archivos en formato portátil de Acrobat. Autoriza la señorita: Siomara Lastenia Redrobán Amores, que lo entreguen al Ing. Wilson Sánchez O., en su calidad de Director de Carrera.

Latacunga, Febrero de 2014

.....
Ing. Diego Ortiz
DIRECTOR

.....
Ing. Hernán Iturralde
CODIRECTOR

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
CERTIFICADO

ING. DIEGO ORTIZ (DIRECTOR)
ING. HERNÁN ITURRALDE (CODIRECTOR)

CERTIFICAN:

Que el trabajo titulado “**ESTUDIO DE LOS ESQUEMAS DE CONEXIÓN DE LOS ELEMENTOS DE PROTECCIÓN DE SOBREVOLTAJE DEL ALIMENTADOR PILISHURCO, COMO UNA MEDIDA PARA LA REDUCCIÓN DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD DEL SERVICIO ELÉCTRICO FMIK (FRECUENCIA MEDIA) Y TTIK (TIEMPO PROMEDIO) DE INTERRUPCIÓN DE LA EMPRESA ELÉCTRICA AMBATO**”, realizado por SIOMARA LASTENIA REDROBÁN AMORES, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la ESPE, en el Reglamento de Estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

Debido a que constituye un trabajo de excelente contenido científico que coadyuvará a la aplicación de conocimientos y al desarrollo profesional, se recomiendan su publicación.

El mencionado trabajo consta de UN empastado y UN disco compacto el cual contiene los archivos en formato portátil de Acrobat. Autoriza la señorita: Siomara Lastenia Redrobán Amores, que lo entreguen al Ing. Wilson Sánchez O., en su calidad de Director de Carrera.

Latacunga, Febrero de 2014

.....
Ing. Diego Ortiz
DIRECTOR

.....
Ing. Hernán Iturralde
CODIRECTOR

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Yo, Siomara Lastenia Redrobán Amores

DECLARO QUE:

El proyecto de grado denominado “**ESTUDIO DE LOS ESQUEMAS DE CONEXIÓN DE LOS ELEMENTOS DE PROTECCIÓN DE SOBREVOLTAJE DEL ALIMENTADOR PILISHURCO, COMO UNA MEDIDA PARA LA REDUCCIÓN DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD DEL SERVICIO ELÉCTRICO FMIK (FRECUENCIA MEDIA) Y TTIK (TIEMPO PROMEDIO) DE INTERRUPCIÓN DE LA EMPRESA ELÉCTRICA AMBATO**”, ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan el pie de las páginas correspondiente, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de autoría propia.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Latacunga, Febrero de 2014

.....
Siomara Lastenia Redrobán Amores

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE
CARRERA DE INGENIERIA ELECTROMECAÁNICA

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, Siomara Lastenia Redrobán Amores

AUTORIZO

A la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución el trabajo **“ESTUDIO DE LOS ESQUEMAS DE CONEXIÓN DE LOS ELEMENTOS DE PROTECCIÓN DE SOBREVOLTAJE DEL ALIMENTADOR PILISHURCO, COMO UNA MEDIDA PARA LA REDUCCIÓN DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD DEL SERVICIO ELÈCTRICO FMIK (FRECUENCIA MEDIA) Y TTIK (TIEMPO PROMEDIO) DE INTERRUPCIÓN DE LA EMPRESA ELÈCTRICA AMBATO”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Latacunga, Febrero de 2014

.....
Siomara Lastenia Redrobán Amores

AGRADECIMIENTO

Agradezco a DIOS por guiarme en cada uno de mis pasos a lo largo de mi vida, a mi MADRE y a mis HERMANOS por todo su apoyo incondicional para la culminación de este trabajo y de mis estudios.

Agradezco el apoyo de la Empresa Eléctrica Ambato S.A. para el desarrollo de la misma, al jefe de Protecciones Eléctricas Ing. Mario Morales por compartir sus conocimientos, por su esfuerzo y dedicación a este proyecto.

A mi Director de tesis Ing. Diego Ortiz y Codirector Ing. Hernán Iturralde, por impartir sus conocimientos y ser guías en la etapa culminante de mi vida, por su dedicación y apoyo para sacar adelante este trabajo.

DEDICATORIA

Dedico este esfuerzo a Dios, a mi Padre Luis Alfredo que desde el cielo siempre me ha cuidado y a guiado en los momentos difíciles de mi vida, a mi Madre Cumandá, a mis Hermanos Mishel y Luis por ser mi apoyo a cada momento de mi vida, y a mi enamorado por su apoyo, paciencia y comprensión.

ÍNDICE GENERAL

CARÁTULA.....	i
CERTIFICADO.....	ii
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD.....	iii
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
DEDICATORIA.....	vii
ÍNDICE GENERAL.....	viii
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	ix
ÍNDICE DE GRAFICAS.....	xiii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xvii
ANEXOS.....	xix

ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen.....	1
Summary.....	3
CAPÍTULO I	
ASPECTOS GENERALES	5
1.1 Generalidades	5
1.1.1 Antecedentes	5
1.1.2 Planteamiento del Problema	6
1.1.3 Objetivo General	6
1.1.4 Objetivos Específicos	6
1.2 Introducción.....	7
1.3 Sistema Eléctrico de la EEASA	8
1.4 Alimentador Pilishurco.....	11
1.4.1 Características Técnicas	11
1.4.2 Ubicación.....	12
1.4.3 Historial	13
1.5 Índices de Calidad del Servicio de Energía Eléctrica.	16
1.5.1 Calidad de Servicio Técnico.....	18
1.5.1.1 Interrupciones a ser Consideradas	18
1.5.2 Índices de Calidad de Servicio Técnico.....	18

1.5.3 Límites de los Índices de Calidad.....	20
--	----

CAPÍTULO II

SOBREVOLTAJE EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN 22

2.1 Sobrevoltajes.....	22
------------------------	----

2.2 Clasificación de los Sobrevoltaje.....	22
--	----

2.2.1 Por Duración	22
--------------------------	----

2.2.2 Por su Origen.	25
---------------------------	----

2.2.3 Descargas Atmosféricas.....	34
-----------------------------------	----

2.2.3.1 Efectos de las Descargas Atmosféricas	35
---	----

2.2.4 Probabilidad de Caída de Rayos en las Redes Aéreas,.....	42
--	----

2.3 Ondas Viajeras	43
--------------------------	----

CAPÍTULO III

PROTECCIÓN DE SOBREVOLTAJE EN LÍNEAS AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN..... 46

3.1 Protección de Equipos y Líneas con Descargadores	46
--	----

3.1.1 Clasificación de los Descargadores por su Construcción.....	48
---	----

3.1.2 Régimen de Operación de los Descargadores de ZnO	52
--	----

3.1.3 Clasificación de los descargadores por su Aplicación.....	55
---	----

3.1.4 Degradación y Fallas Típicas de los Descargadores	56
---	----

3.1.5 Módulo de Desconexión de los Descargadores (Surge Disconnecter)	58
--	----

3.2 Esquemas de Conexión de los Descargadores.	59
---	----

3.2.1	Esquemas en Función de la Conexión al Neutro y Tierra.	60
3.2.2	Esquemas en Función de la Conexión de la Bajante de MV	61
3.2.3	Esquemas en Función de la Ubicación del Fusible	63
3.3	Comportamiento de los Elementos de Protección de I Sobrecorriente Frente a Transitorios de Sobrevoltajes Impulsivos	66
 CAPÍTULO VI		
MODELAMIENTO DEL ALIMENTADOR PILISHURCO.....		72
4.1	Modelamiento De Sobrevoltajes Originados por Rayos	72
4.1.1	Cálculo de Densidad de Descargas a Tierra. (Descargas/km ² /año).....	74
4.1.2	Cálculo de la Probabilidad de Caída de Rayos en el Alimentador Pilishurco.....	74
4.1.3	Cálculo del Número de impactos por descargas directas Descargas/100k/Año.....	74
4.1.4	Cálculo del Número de impactos por descargas inducidos Descargas/100k/Año.....	75
4.1.5	Cálculo de voltaje inducido por una descarga directa	80
4.2	Modelamiento del Equipo de Protección de Sobrevoltaje.	81
4.3	Modelamiento de un fusible frente a sobrevoltajes.....	84
4.4	Modelo de la Puesta a Tierra.	85
4.5	Modelo de los Transformadores de Distribución.	86

4.6	Modelamiento de la Línea Aérea de Distribución	90
4.7	Modelamiento Eléctrico de la Estructura de Soporte.....	91
4.8	Modelo Completo de un Tramo del Alimentador Pilishurco	92
CAPÍTULO V		
ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES		95
5.1	Discusión de los Resultados del Modelamiento de los Esquemas de Conexión de los elementos de Protección de Sobrevoltaje	99
5.2	Discusión de los Resultados del Modelamiento del Alimentador Pilishurco Frente a Sobrevoltajes.....	103
CAPÍTULO VI		
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		117
6.1	CONCLUSIONES.....	117
6.2	RECOMENDACIONES	120
BIBLIOGRAFÍA Y NETGRAFÍAS		121

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico No. 1: Mapa de las Áreas de Concesión de las Distribuidoras.....	8
Gráfico No. 2: Diagrama Unifilar del Sistema Eléctrico de la EEASA.	10
Gráfico No. 3: Diagrama Unifilar de la Subestación Atocha.....	11
Gráfico No. 4: Diagrama Unifilar del Alimentador Pilishurco tomada del Arc Gis	12
Gráfico No. 5: Georeferenciada del alimentador Pilishurco	13
Gráfico No. 6: Estado de transformadores debido a descargadores averiados.....	14
Gráfico No. 7: Índices de Calidad de Servicio del año 2012	21
Gráfico No. 8: Índices de Calidad de Servicio del año 2013	21
Gráfico No. 9: Onda de sobrevoltaje característica.....	22
Gráfico No. 10: Transitorio simple y complejo.....	24
Gráfico No. 11: Transitorio positivo y negativo.....	24
Gráfico No. 12: Onda temporal y transitoria.....	25
Gráfico No. 13: Onda de sobrevoltaje transitoria y permanente.	25
Gráfico No. 14: Diagrama de sistema en que un transformador energizado puede introducir sobrevoltajes.....	28
Gráfico No. 15: Circuito equivalente para el análisis del sistema.....	28
Gráfico No. 16: Energización de un banco de capacitores.	29
Gráfico No. 17: Onda de sobrevoltaje conexión de banco de capacitores.....	29
Gráfico No. 18: Desconexión de un banco de capacitores.	30
Gráfico No. 19. Onda de sobrevoltaje por desconexión de banco de capacitores.....	31
Gráfico No. 20: Circuito Ferrosónico en serie.....	32
Gráfico No. 21: Forma de onda de sobrevoltaje a frecuencia industrial...	33

Gráfico No. 22: Características de la Nube Cumulus Nimbus.	34
Gráfico No. 23: Tipos de rayos entre nube y tierra.	35
Gráfico No. 24: Descarga directa de un rayo.	37
Gráfico No. 25: Descarga indirecta de un rayo.	38
Gráfico No. 26: Efectos de un sobrevoltaje por descargas indirectas.	39
Gráfico No. 27: Sobrevoltaje por Flameo Inversa.	40
Gráfico No. 28: Mapa del Nivel Ceraúnico del Ecuador.	43
Gráfico No. 29: Onda viajera en líneas aérea.	44
Gráfico No. 30: Ondas viajeras para diferentes eventos.	45
Gráfico No. 31: Primer descargador utilizado en las líneas de distribución.	47
Gráfico No. 32: Nivel de protección de los descargadores para la coordinación de aislamiento.	48
Gráfico No. 33: Diferencia en la Construcción y Curva de Operación de los Descargadores SiC y ZnO.	49
Gráfico No. 34: Descargadores de SiC a) con gaps y b) sin gaps.	50
Gráfico No. 35: Bloque de un Varistor de Óxido Metálico.	51
Gráfico No. 36: Partes constructivas de un descargador de ZnO.	51
Gráfico No. 37: Operación del Descargador ZnO.	52
Gráfico No. 38: Voltaje y Corriente de Operación del Descargador.	53
Gráfico No. 39: Curva Característica VI de Descargadores de ZnO.	53
Gráfico No. 40: Curvas de Operación de los Descargadores de ZnO y Sic.	54
Gráfico No. 41: Energía que Soportan los Descargadores ZnO.	55
Gráfico No. 42: Tipos de Descargadores: a) Distribución, b) Intermedio y c) Estación.	55
Gráfico No. 43: Avería por mal funcionamiento de los descargadores.	57

Gráfico No. 44: Esquema de un GDL	58
Gráfico No. 45: Curva Tiempo – Corriente de un GDL	59
Gráfico No. 46: Esquemas de Conexión de la Bajante de Tierra, Tanque del Transformador y el Neutro: a) Sin Conexión b) Con Gaps y c) Sólida.	60
Gráfico No. 47: Recorrido de la corriente del rayo y los voltajes inducidos.	61
Gráfico No. 48: Esquemas de conexión de la bajante de MV y Tierra.....	62
Gráfico No. 49: Formas de Onda de Voltaje que Aparece en el Transformador debido a Lazos Inductivos.	63
Gráfico No. 50: Conexión del descargador en un transformador 1 ϕ : (a) antes del fusible, en el lado de la carga	63
Gráfico No. 51: Relación entre la corriente de impulso y el tiempo de fusión del fusible.....	67
Gráfico No. 52: Curva Característica Tiempo Corriente y Valores de I^2t de Fusibles.	71
Gráfico No. 53: Forma de onda característica rayo	73
Gráfico No. 54: Factor de apantallamiento de objetos cercanos para una altura de la línea de distribución de 10m	75
Gráfico No. 55: Número de voltajes inducidos versus el Nivel de Aislamiento de la Línea	76
Gráfico No. 56: Probabilidad de exceder determinado valor de Corriente de Rayo.	78
Gráfico No. 57: Modelo del Rayo en Simulink	81
Gráfico No. 58: Modelo de un descargador en Simulink.....	82
Gráfico No. 59: Curva característica V-I de un descargador de oxido de Zinc	83
Gráfico No. 60: Modelo de un descargador de Oxido Metálico.....	84
Gráfico No. 61: Modelo del Fusible.....	85
Gráfico No. 62: Modelo de puesta a tierra de la fuente.....	85

Gráfico No. 63: Modelo en Simulink de un transformado de 2 o 3 devanados.....	86
Gráfico No. 64: Modelo de un Transformador Monofásico con la capacitancia al lado de bajo voltaje y alto voltaje.	87
Gráfico No. 65: Medición de la capacitancia del descargador.	87
Gráfico No. 66: Modelamiento completo de un transformador monofásico.	88
Gráfico No. 67: Modelo del circuito PI de una línea aérea. a) y b).....	90
Gráfico No. 68: Modelo del Poste, Cruceta y Aisladores	91
Gráfico No. 69: Diagrama Esquemático de los Tramos más Representativos del Alimentador Pilishurco.	93
Gráfico No. 70. Modelo en Simulink del Tramo más significativo del Alimentador Pilishurco.....	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla No. 1: Registros de Reclamos por Corte de Subministro de Energía.....	15
Tabla No. 2: Límites admisibles de los índices de calidad de servicio técnico.....	20
Tabla No. 3: Índices de Calidad de Servicio de la EEASA.....	20
Tabla No. 4: Sobrevoltajes Según su Origen.....	26
Tabla No. 5: Tipos de formas de onda y sus características.	41
Tabla No. 6: Tipos de Conexión de los descargadores	65
Tabla No. 7: Equivalencia entre los Fusibles K, T y N	68
Tabla No. 8: Integral estandar de energia de la onda de rayo 8x20 ms.....	69
Tabla No. 9: Fusibles para sobrecorriente debido a sobrevoltajes.	70
Tabla No. 10: Parámetros de distribución normal logarítmicas para descargas.....	73
Tabla No. 11: Parámetros para el modelamiento del descargador	83
Tabla No. 12: Esquemas de Conexión de los Transformadores Monofásicos	89
Tabla No. 13: Voltaje Aplicado según el Pico de Corriente del Rayo.....	95
Tabla No. 14: Tabla de Propuesta a Analizar para los Esquemas de Conexión de los Elementos de Protección de Sobrevoltaje	96
Tabla No. 15: Tabla de Propuesta a Analizar del Tramo mas significativo del Alimentador Pilishurco con el Esquemas Elegido	96
Tabla No. 16: Tabla de Resultados de Modelación de Esquemas de Conexión de los Elementos de Protección de Sobrevoltaje	101
Tabla No. 17: Resultados del Modelo Completo para un Pico de Corriente de Rayo de 10kA	105

Tabla No. 18: Resultados del Modelo Completo para un Pico de Corriente de Rayo de 20kA	109
Tabla No. 19: Resultados del Modelo Completo para un Pico de Corriente de Rayo de 30kA	113

ANEXOS

ANEXO A

PARAMETROS DEL ALIMENTADO PILISHURCO

ANEXO B

MODELO DE LOS ESQUEMAS DE CONEXIÓN DE LOS
DESCARGADORES

RESUMEN

El presente estudio tiene como propósito analizar alternativas que permitan mejorar los índices de calidad de los alimentadores primarios de distribución, disminuyendo el número de aperturas ocasionadas por descargas atmosféricas, para este análisis se utiliza la aplicación Simulink del Software Matlab, en la cual se modela el comportamiento de los distintos elementos que conforman las redes aéreas frente a sobrevoltajes de tipo atmosférico; para validar estos modelos se analizó un tramo del alimentador Pilishurco de la Empresa Eléctrica Ambato.

Para su análisis se realizó la simulación de cada uno de los esquemas dividiéndolos en casos según corresponde el tipo de puesta a tierra, ubicación del fusible y tipo de transformador (convencional o autoprotegido). Para la simulación de los esquemas de conexión de los descargadores, se realizó el modelamiento de los siguientes elementos: el rayo (descarga atmosférica), descargador de Oxido Metálico, el Fusible, los aisladores, los transformadores (monofásicos y trifásicos), la puesta a tierra y los tramos de línea, lo que es necesario aclarar que el modelo de la línea es de parámetros distribuidos dependiente de la frecuencia. Estos modelos están basados en la teoría del programa EMTP el cual es un software utilizado para estudios de sobrevoltaje. Para cada caso el impacto del rayo fue directo al esquema ya que se considero el peor escenario es decir en condiciones extremas.

Se valida los modelos en el Alimentado Pilishurco, ya que en la ciudad de Ambato es el alimentador que presenta el mayor índice de fallas de tipo atmosférico, por cuanto está ubicado en la cima del cerro del mismo nombre, el cual tiene un alto nivel ceraúnico, por lo tanto es necesario evaluar la mejor propuesta entre los esquemas de conexión de los descargadores de sobrevoltaje utilizados en EEASA y los que existen en las fuentes bibliográficas, este análisis se realiza mediante la simulación

de los modelos de los esquemas de conexión de los elementos de protección de sobrevoltaje.

Después de obtener como resultado del análisis el mejor esquema de conexión de los elementos de protección de sobrevoltaje tanto para redes monofásicas como trifásicas, se procedió a simular el modelo completo que consiste en el tramo de mayor probabilidad de ocurrencia de rayos del Alimentador Pilishurco con un ramal trifásico y monofásico donde se aplicó el impacto directo del rayo en la fase B del poste #4 del tramo trifásico con el fin de conocer el efecto del esquema elegido en Alimentado Pilishurco, y analizar los índices de calidad de servicio técnico (FMIK y TTIK), mediante la apertura del fusible. También se analiza la actuación de los aisladores para identificar hasta que vano afecta el rayo y así concluir si es necesario colocar o no los descargadores, como también analizar cada que distancia se deben colocar los descargadores a lo largo de la línea del Alimentador Pilishurco.

SUMMARY

The present study aims to analyze alternatives for improving the quality indices of distribution feeders, reducing the number of openings caused by lightning, for this analysis is used the application of Software Matlab Simulink, in which the behavior is modeled of the different elements that make up the air networks against surges of atmospheric type, to validate these models was analyzed a section of the feeder Pilishurco of the Empresa Eléctrica Ambato.

For analysis of each of the schemes was performed by dividing them into cases as appropriate the type of grounding, fuse location and type (conventional or self-protected) transformer. For the simulate of the connection diagrams of the arresters, was performed modeling the following elements: lightning (lightning), Metal Oxide discharger, the fuse, insulators, transformers (single and three phase), the set land and line sections, which is necessary to clarify that the model of distributed parameter line is frequency dependent. These models are based on the theory of EMTP program which is a software used for studies of surge. For each case the lightning strike went straight to the scheme as it was considered the worst case scenario in extreme conditions.

The models is validated on the Feeder Pilishurco, as in the city of Ambato is the feeder that has the highest failure rate of atmospheric type, because it is located on top of the hill of the same name, which has a high level keraunic therefore it is necessary to evaluate the best proposals from the wiring diagrams of surge arresters used in EEASA and those that exist in the bibliographic sources, this analysis is performed by simulating the models of the wiring diagrams of the elements overvoltage protection.

After obtaining as a result of the analysis the best connection diagram of elements overvoltage protection, for both single-phase and three-phase,

we proceeded to simulate the full model consisting of the section of higher likely to occur of Lightning in the Feeder Pilishurco with a branch three-phase and single-phase, where a direct lightning strike in B-phase of the pole # 4 of the three-phase stretch in order to know the effect of the scheme chosen in the feeder Pilishurco was applied, and analyze the quality indices of service (FMIK and TTIK), through opening the fuse. Performance of insulators is also analyzed for identify until that vain the affects the lightning and so conclude if is necessary to place or not the surge arrester, as analyze each that distance can be placed the surge arresters along of the line of the feeder Pilishurco

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1 Generalidades

1.1.1 Antecedentes

En los últimos años la Empresa Eléctrica Ambato S.A. (EEASA), se ha visto en la necesidad de realizar varias mejoras en los esquemas de conexión de los componentes de las redes eléctricas de distribución, ya que se producen un alto número de aperturas de los alimentadores debido a múltiples causas conocidas y desconocidas. Una de las cuales son las averías en los elementos de protección de sobrevoltajes (descargadores de óxido metálico) de los equipos de las redes eléctricas aéreas como transformadores, capacitores, interruptores y reconectadores.

Los esquemas de conexión actuales de los descargadores frente a una actuación por sobrevoltaje o una avería interna, provocan una apertura del alimentador desde la cabecera, lo que indica que el sistema de protecciones del alimentador no tiene una selectividad adecuada.

Por esta razón es necesario el estudio de los esquemas de conexión de las protecciones de sobrevoltaje en las redes de distribución aéreas y su ubicación en zonas de mayor probabilidad de ocurrencia de sobrevoltajes. Adicionalmente cabe indicar que el M.E.E.R (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable) y la EMPRESA ELECTRICA AMBATO S.A. en la actualidad tienen como política prioritaria la mejora de la calidad de servicio eléctrico, para así garantizar el suministro de energía eléctrica permanente. Los indicadores inmersos en esta temática son el número (FMIK frecuencia media) y tiempo (TTIK Tiempo promedio) de

interrupciones, cuyos límites están definidos en la regulación (004/2001) del CONELEC (Consejo Nacional de Electricidad).

1.1.2 Planteamiento del Problema

El problema que se presenta actualmente, en el Alimentador Pilishurco es la apertura total de la red producido por la conexión actual de los descargadores al detectar un sobrevoltaje por descargas atmosféricas o maniobras, o al ocurrir una avería interna del descargador.

Por lo tanto si se quiere tener mayor selectividad en las zonas que producen la apertura del alimentador Pilishurco es necesario realizar el estudio de los esquemas de conexión y de las protecciones de sobrevoltaje en la red de distribución.

1.1.3 Objetivo General

- Realizar un estudio de los esquemas de conexión de los elementos de protección de sobrevoltaje del alimentador Pilishurco, como una medida para la reducción de los índices de calidad del servicio eléctrico FMIK (frecuencia media) y TTIK (tiempo promedio) de interrupciones de la EMPRESA ELECTRICA AMBATO.

1.1.4 Objetivos Específicos

- Realizar una búsqueda de los esquemas de conexión instalados de las protecciones de sobrevoltaje en la EMPRESA ELECTRICA AMBATO S.A.
- 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 sobrecorriente asociados a los esquemas de conexión presente en el alimentador Pilishurco.
- Determinar el mejor esquema de conexión mediante los valores de corrientes en los elementos de protección de sobrevoltaje del alimentador Pilishurco de la EMPRESA ELECTRICA AMBATO S.A.

1.2 Introducción

Desde su inicio los sistemas eléctricos tuvieron la necesidad de proteger sus redes frente al crecimiento abrupto de la forma de onda de voltaje originados por fenómenos tanto internos como externos, por lo que se han ingeniado múltiples tecnologías para la protección frente a estos fenómenos; siendo la más utilizada la protección con el uso de Descargadores de Sobrevoltaje (Surge Arresters), 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.

Los esquemas de conexión de estos descargadores de igual manera se han desarrollado de múltiples maneras, la eficacia de cada una de ellas ha sido muy cuestionada, desde el punto de vista de sensibilidad, selectividad y en los últimos tiempos desde la confiabilidad de los sistemas eléctricos.

Tal es el caso del Sistema Eléctrico de Distribución de la Empresa Eléctrica Ambato (EEASA), la que tiene como política principal la mejora continua de sus procesos y dentro de ello la mejora de la calidad del producto técnico. Por esta razón en el presente proyecto se realiza el estudio de los esquemas de conexión de los descargadores en las redes aéreas de distribución de la EEASA, tomando como modelo al Alimentador Pilishurco.

1.3 Sistema Eléctrico de la EEASA

La Empresa Eléctrica Ambato Regional Centro Norte suministra el servicio de electricidad a 239144 clientes registrados a diciembre de 2012, distribuidos en una área de concesión de 40800 km² que comprende la provincia de Tungurahua y parte de las provincias de Morona Santiago, Napo y Pastaza: esto representa al 14.8% del territorio ecuatoriano, siendo la empresa de distribución con mayor área de concesión del país. En el Gráfico No. 1 se observar toda el área de concesión de la EEASA.

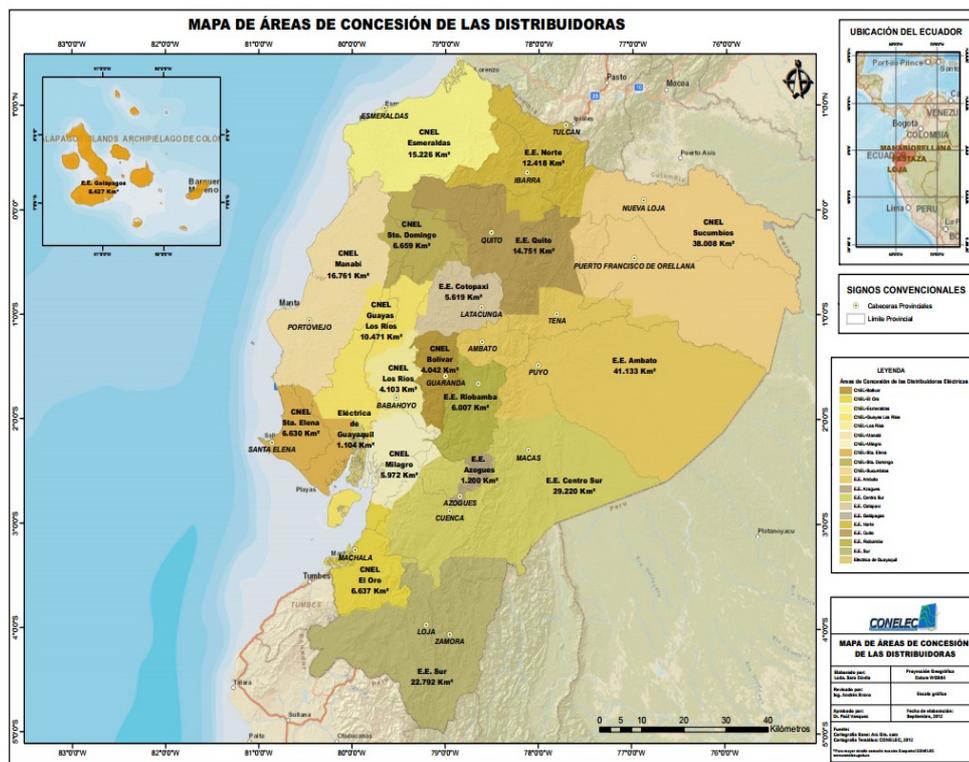
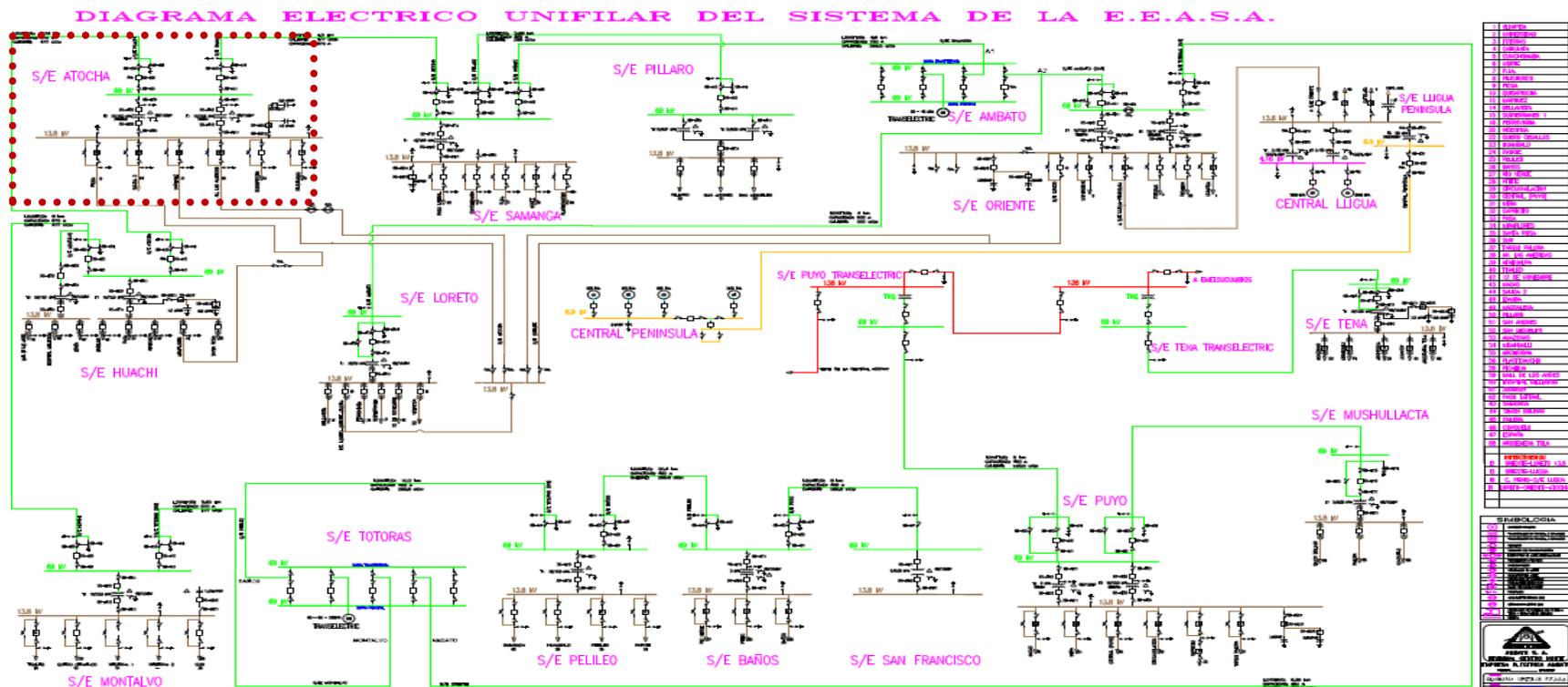


Gráfico No. 1: Mapa de las Áreas de Concesión de las Distribuidoras.

Fuente: www.conelec.gob.ec

El sistema eléctrico de distribución de la EEASA está compuesto de 13 subestaciones de transformación, con 19 transformadores de potencia, 4470 km de red aérea de MT que corresponden a 56 alimentadores, que alimentan 11786 centros de alimentación de distribución, en el Gráfico

No. 2 se observa el diagrama unifilar de la EEASA, donde se encuentran las subestaciones antes descritas con sus respectivos alimentadores.



¹ EEASA [2012], Diagrama Unifilar, Recuperado de <http://www.eeasa.com.ec/estructura/automaticas/diagramau1.php>

1.4 Alimentador Pilishurco

1.4.1 Características Técnicas

En el Gráfico No. 3 se observa el alimentador Pilishurco el cual es parte de la subestación Atocha, con un nivel de voltaje de operación de 13800 voltios, con una construcción aérea trifásica de 10 km de longitud que permite suministrar el servicio eléctrico a 180 clientes, de los cuales el 75% son de tipo residencial ubicados en los sectores de Laquigo, San José, San Francisco y Constantino Fernández de la Parroquia Agosto N. Martínez, y el 25% de clientes restantes corresponden a clientes comerciales correspondientes a antenas de telecomunicaciones de diferentes medios, ubicados al final de este alimentador en la cumbre del cerro Pilishurco.

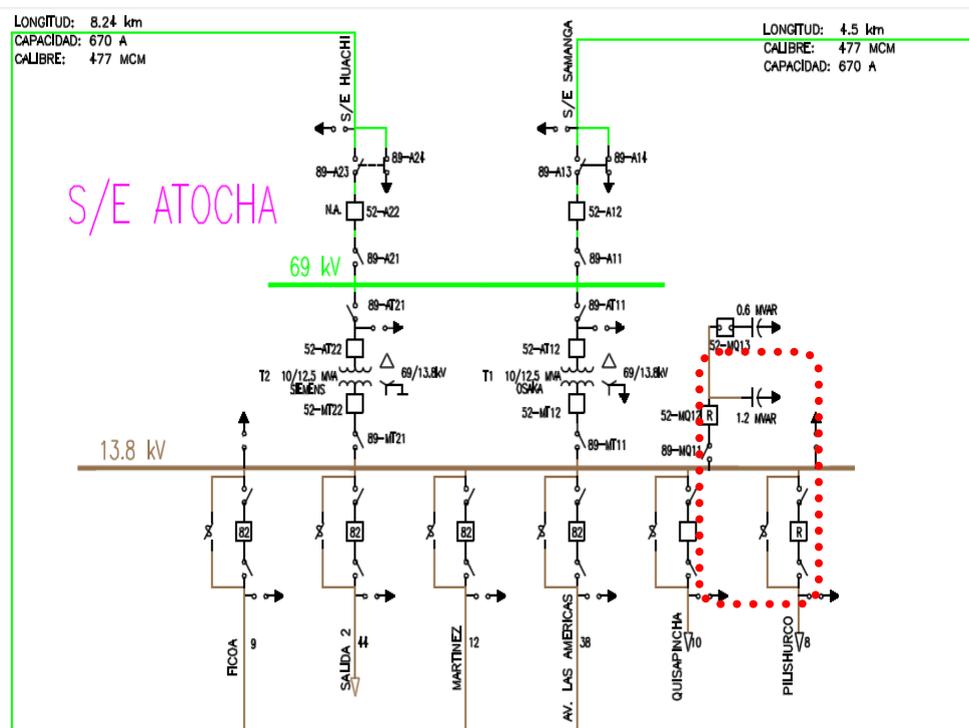


Gráfico No. 3: Diagrama Unifilar de la Subestación Atocha.

Fuente: www.eeasa.com.ec.

En el Gráfico No. 4 se observa el diagrama unifilar del alimentador Pilishurco, donde encontramos los diferentes ramales y el área geográfica.

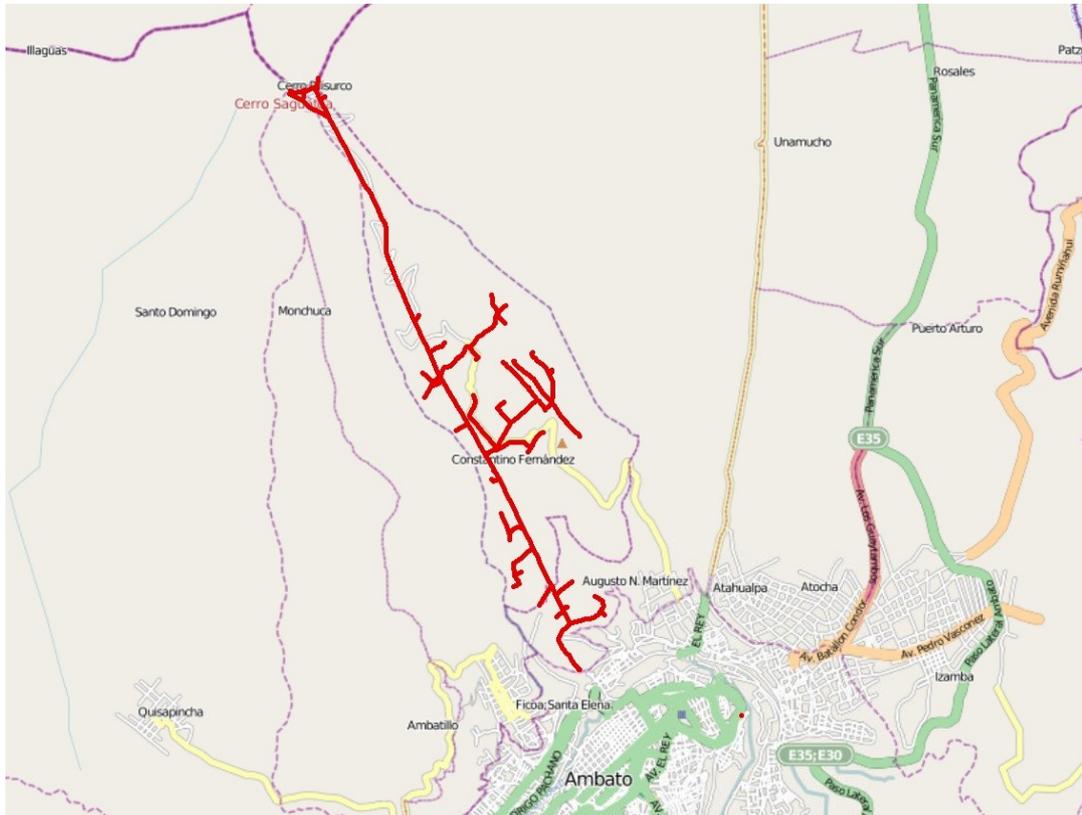


Gráfico No. 4: Diagrama Unifilar del Alimentador Pilishurco tomada del Arc Gis

Fuente: Programa Arc Gis²

1.4.2 Ubicación

El alimentador Pilishurco está ubicado al noroccidente de la ciudad de Ambato partiendo de la subestación Atocha la cual está a 2616 msnm, el trayecto en su totalidad es a campo traviesa, esto es: en el arranque atraviesa por huertas frutales de baja altura, mientras que en la zona

² Se obtuvo de la base de datos de la EEASA.

intermedia está junto a pequeñas casas del sector de Constantino Fernández, hacia adelante en su recorrido se encuentra la zona protegida del cerro Pilishurco en el cual se encuentra el extenso bosque de pinos, los cuales son de una altura promedio que sobrepasan la red de este alimentador, y por último en la parte final este a traviesa por una colina copada en su totalidad de pajonal de muy baja altura, está a una altura de 4120 msnm. En Gráfico No. 5 se observa la ubicación geográfica del alimentador Pilishurco.

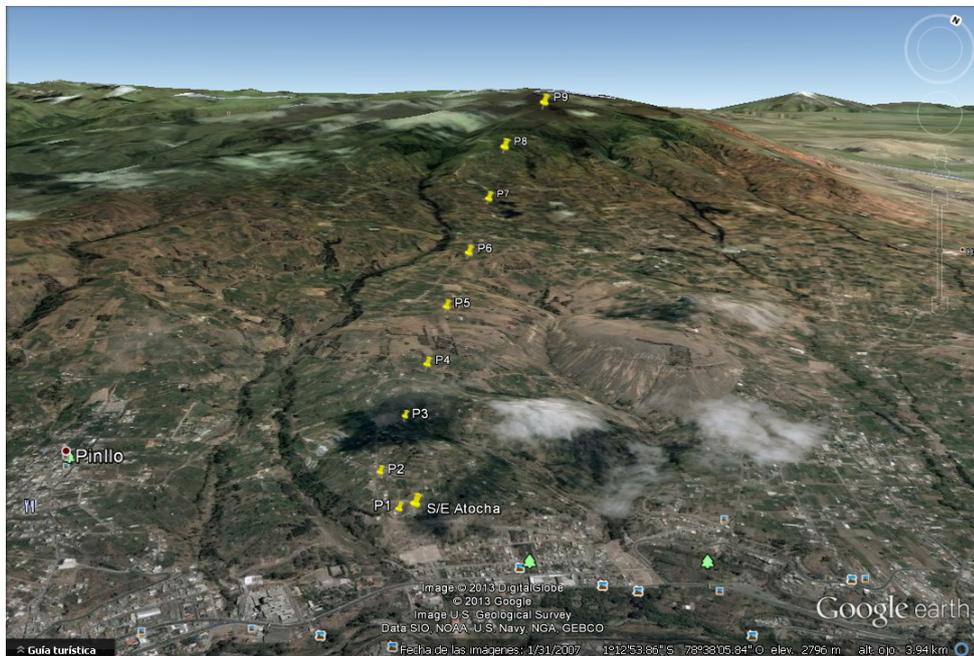


Gráfico No. 5: Georeferenciada del alimentador Pilishurco

Fuente: Google Earth³.

1.4.3 Historial

Este alimentador al ser de construcción aérea y estar ubicado en la cumbre de un cerro ha sufrido los efectos de las descargas atmosféricas tal como se registran en el historial de eventos de falla de este

³ Se obtuvo la Georeferenciada de Google Earth

alimentador, dentro de los más críticos se encuentra la falla de aislamiento interno y externo de transformadores, ruptura de los tanques de transformadores, descargadores averiados, sistema de puesta a tierra rotos, equipos electrónicos de telecomunicaciones quemados, entre los más importantes. En el Gráfico No. 6 se observan los daños en los transformadores del Alimentador Pilishurco provocados por descargas atmosféricas.

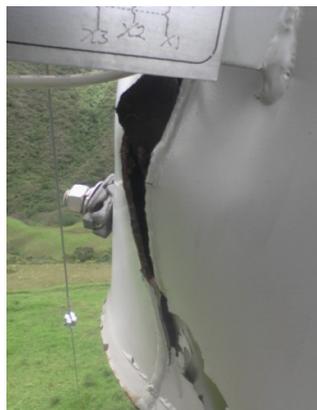


Gráfico No. 6: Estado de transformadores debido a descargadores averiados.

Fuente: Laboratorio de transformadores EEASA

Los registros de reclamos averías en el servicio eléctrico por consumidores en diferentes zonas que comprende el alimentador Pilishurco permite determinar la mayor causa de interrupción de energía eléctrica en los años 2011 y 2012, también el tiempo total de las interrupciones por año hasta la reanudación del servicio eléctrico como se muestra en la Tabla No. 1

Mediante este registro se observa que la mayor causa de las interrupciones de servicio reportadas por parte del personal de reparaciones son de tipo desconocidas; razón por la cual se han realizado diferentes estudios e informes técnicos por parte del personal técnico del departamento de operación y mantenimiento de la EEASA, en los que se determinó que las causas identificadas inicialmente como desconocidas eran de origen atmosférico, el resultado de las inspecciones de campo que evidencian que los daños a los equipos y elementos del alimentador son: descargadores averiados, aisladores flameados, fallas en el aislamiento interno y/o externo de los transformadores de distribución, entre otras.

Tabla No. 1: Registros de Reclamos por Corte de Subministro de Energía.

AÑO	Nº DE REPETICIONES	CAUSAS ESPECIFICAS DE LA INTERRUPCIÓN	TIEMPO TOTAL DE INTERRUPCIÓN(Hr)
2011	19	DESCONOCIDAS	207,76
2011	2	CORROSIÓN	64,02
2011	3	DESCARGAS ATMOSFÉRICOS	20,71
2011	6	DETERIORO DE EQUIPOS Y MATERIALES	45,79
2011	1	DAÑOS O INTERFERENCIA INTENCIONAL PARTICULARES	3,32
2011	1	MANIOBRAS	1,5
2011	1	OTROS	14,85
2011	1	VIENTOS FUERTES	1,25
2011		CHOQUE DE VEHÍCULOS	24,23
2012	3	DETERIORO DE EQUIPOS Y MATERIALES	32,17
2012	3	VIENTOS FUERTES	54,32
2012	5	ARBOLES	38,18
2012	5	CORROSIÓN	133,48
2012	19	DESCONOCIDAS	212,13
2012	1	CHOQUE DE VEHÍCULOS	4,18
2012	1	DAÑOS O INTERFERENCIA INTENCIONAL PARTICULARES	1,25

Fuente: Autoría Propia

Se realizó la revisión de fallas que involucraron la apertura total del alimentador Pilishurco registradas por parte del Centro de Control de

Carga (CECON⁴) y se obtuvo que en el año 2011 existieron 2 aperturas totales del alimentador Pilishurco la primera con un tiempo de duración de 5.5 horas, posterior a ello existieron diferentes reclamos de daños de varios sectores dentro de los cuales se comprobó fluctuaciones de voltaje mientras que la segunda apertura tuvo una duración de 15 minutos para realizar trabajos de reajustes en los empalmes y puentes aéreos [1].

1.5 Índices de Calidad del Servicio de Energía Eléctrica.

La calidad del servicio de energía eléctrica es un amplio término relacionado con la continuidad y la calidad de la forma de onda. La continuidad del servicio es lo que tradicionalmente se ha denominado confiabilidad y básicamente es clasificada con los siguientes aspectos: número de interrupciones por año, tiempo promedio por interrupción y usuarios afectados en promedio por interrupción.

Una interrupción es una pérdida completa de tensión durante un intervalo de tiempo, que dependiendo del tiempo que duren las interrupciones se clasifican en: instantáneas (0.5 - 30 ciclos), momentáneas (30 ciclos - 2 segundos), temporales (2 segundos - 2 minutos) y de larga duración (mayores a 2 minutos) [2].

La calidad de voltaje es un término usado para describir la relativa cantidad de disturbios o variaciones de voltaje, particularmente en lo que se refiere a: armónicos, fluctuaciones de voltaje, transitorios y factor de potencia.

Los disturbios e interrupciones siempre han existido en los sistemas eléctricos de distribución, solo que hoy en día estas condiciones se ven agravados por las siguientes causas:

⁴ CECON.- Centro de Control de Cargas de EEASA.

- La alta dependencia de la actividad humana con la energía eléctrica
- La revolución de la electrónica, que ha creado equipos muy sensibles a los disturbios y a las interrupciones, especialmente aquellos que usan funciones de memoria.

La EEASA no está exenta de esta problemática y está regida mediante la regulación N° 004/01 emitida por el CONELEC⁵ el 23 de mayo de 2001 que se refiere a la Calidad de Servicio Eléctrico de Distribución.

Los índices de Calidad establecidos en esta regulación son medidos y controlados considerando los siguientes aspectos [2].

- a) Calidad del Producto:
 - Nivel de voltaje
 - Perturbaciones de voltaje
 - Factor de Potencia
- b) Calidad del Servicio Técnico:
 - Frecuencia de Interrupciones
 - Duración de Interrupciones
- c) Calidad del Servicio Comercial:
 - Atención de Solicitudes
 - Atención de Reclamos
 - Errores en Medición y Facturación

Este estudio aborda el tema de la calidad de servicio técnico ya que mediante el estudio de los esquemas de protección de sobrevoltaje en el alimentador Pilishurco se evidenciará si uno de estos esquemas mejora los índices de calidad de suministro de energía.

⁵ CONELEC. Consejo Nacional de Electricidad

1.5.1 Calidad de Servicio Técnico.

La calidad del servicio técnico prestado se evalúa sobre la base de la frecuencia y la duración total de Interrupción, para cada mes del año considerado y para el año completo [2].

1.5.1.1 Interrupciones a ser Consideradas

Para el cálculo de los índices de calidad se considerarán todas 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 [2].

No se considerarán las interrupciones de un consumidor en particular, causadas por falla de sus instalaciones, siempre que ellas no afecten a otros consumidores.

1.5.2 Índices de Calidad de Servicio Técnico.

Los índices de calidad se calcularán para toda la red de distribución (R_d) y para cada alimentador primario de medio voltaje (A_j), de acuerdo a las siguientes expresiones:

a) Frecuencia Media de Interrupción por kVA nominal Instalado (FMIK)

En un período determinado, representa la cantidad de veces que el kVA promedio sufrió una interrupción de servicio [2].

$$\text{FMIK}_{R_d} = \frac{\sum_i \text{kVA} f_{s_i}}{\text{kVA}_{\text{inst}}} \quad \text{Ec. 1}$$

$$\text{FMIK}_{A_j} = \frac{\sum_i \text{kVA} f_{s_{iA_j}}}{\text{kVA}_{\text{inst}A_j}} \quad \text{Ec. 2}$$

b) Tiempo Total de interrupción por kVA nominal Instalado (TTIK)

En un período determinado, representa el tiempo medio en que el kVA promedio no tuvo servicio[2].

$$TTIK_{Rd} = \frac{\sum_i kVA_{fs_i} * Tfs_i}{kVA_{inst}} \quad \text{Ec. 3}$$

$$TTIK_{Aj} = \frac{\sum_i^{A_j} kVA_{fs_{iAj}} * Tfs_{iAj}}{kVA_{instAj}} \quad \text{Ec. 4}$$

Dónde:

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 el tipo de causa considerada en el período en análisis.

$\sum_i^{A_j}$: Sumatoria de todas las interrupciones de servicio en el alimentador "A_j" en el período en análisis.

KVA_{fsj} : Cantidad de kVA nominales fuera de servicio en cada una de las interrupciones "i".

KVA_{fsj} : Cantidad de kVA nominales instalados.

Tfs_i : Tiempo de fuera de servicio, para la interrupción "i"

R_d : Red de distribución global

A_j : Alimentador primario de medio voltaje "j"

1.5.3 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 No. 2.

Tabla No. 2: Límites admisibles de los índices de calidad de servicio técnico.

Indices	Lim FMIK	Lim TTIK
Red	4.0	8.0
Alimentador Urbano	5.0	10.0
Alimentador Rural	6.0	18.0

Fuente: www.conelec.gob.ec [2]

Para los años 2012 y 2013 el cálculo de los índices de calidad de servicio técnico de todos los alimentadores que conforman la EEASA, se observa en la Tabla No. 3.

Tabla No. 3: Índices de Calidad de Servicio de la EEASA

Índices de Calidad de la EEASA		
Año	Lim FMIK	Lim TTIK
2012	13,62	8,48
2013	13,26	10,49

Fuente: EEASA

Para el año 2012 el FMIK tiene un valor de 13,62, el cual si se comparo con los límites de la Tabla No. 2 es un valor alto, mientras que el TTIK es de 8,48, este valor esta casi en el límite, como se puede observar en el Gráfico No. 7.

ÍNDICES DE CALIDAD DEL AÑO 2012

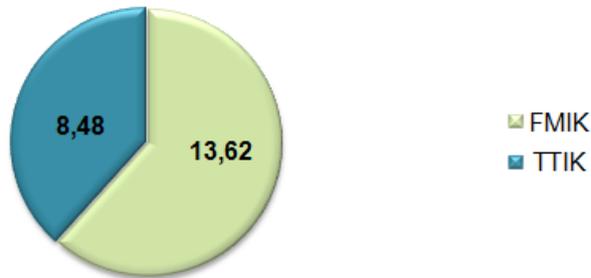


Gráfico No. 7: Índices de Calidad de Servicio del año 2012

Fuente: EEASA

En el Gráfico No. 8 se observa que para el año 2013 el valor de FMIK es de 13,26 y en comparación con el año anterior disminuyó aunque aún no se encuentra en los límites permitidos por el CONELEC. El TTIK es de 10,49 en comparación con el año 2012 aumentó este índice debido al tiempo de demora de la detección de la falla.

ÍNDICES DE CALIDAD DEL AÑO 2013

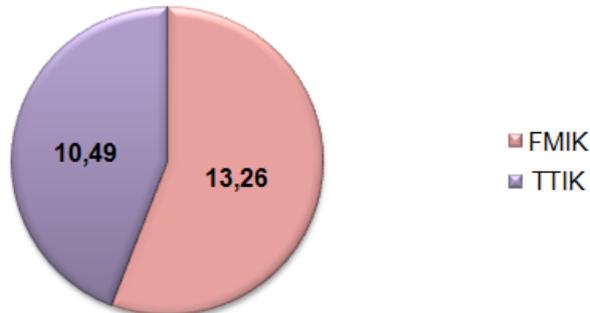


Gráfico No. 8: Índices de Calidad de Servicio del año 2013

Fuente: EEASA

CAPÍTULO II

SOBREVOLTAJE EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN

2.1 Sobrevoltajes.

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 [3], En el Gráfico No. 9 se observa las diferentes formas de onda por sobrevoltaje.

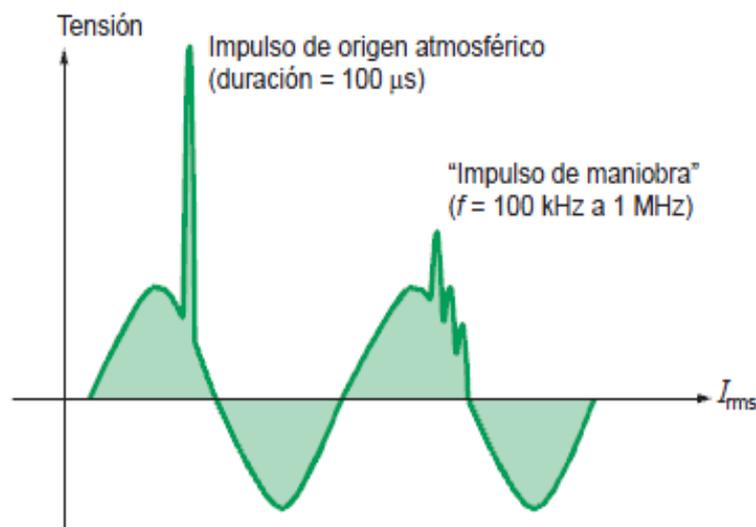


Gráfico No. 9: Onda de sobrevoltaje característica.

Fuente: Schneider, Protecciones contra las sobretensiones.

2.2 Clasificación de los Sobrevoltaje

2.2.1 Por Duración

Los sobrevoltajes en las líneas de media tensión se clasifican en:

- Temporales.
- Transitorios.

a) Sobrevoltajes Temporales.

Son de larga duración, originados por incrementos en el voltaje de la red, generalmente superiores al 10% de su valor nominal y duraciones variables entre décimas de segundo y minutos, y pueden repetirse varias veces a lo largo del tiempo, son poco amortiguados y con frecuencia igual o próxima a la de operación, y pueden ser causados por:

- Fallo del aislamiento
- Pérdida brusca de carga
- Resonancia y ferresonancia
- Pérdida de neutro
- Fenómenos de conexión o desconexión de condensadores

b) Sobrevoltajes Transitorios

Son producidos por maniobras de conexión y desconexión, y el transitorio más severo es producido por descargas atmosféricas, ya que ocasionan graves daños al aislamiento de los transformadores, motores, cables, etc.

En el Gráfico No. 10 se observa que los sobrevoltajes transitorios no tienen la misma forma de onda en comparación con la duración y amplitud del transitorio, ya que pueden ser de frente lento que tiene una duración corta y es fuertemente amortiguada, y de frente rápido que tiene una duración muy corta y amplitud mucho mayor a la tensión de cresta nominal, las cuales se las denomina como transitorios de voltaje simple y transitorios de voltaje complejo respectivamente, las causas de estos sobrevoltajes son:

- Energización y reenganche de líneas
- Cortocircuitos y eliminación de cortocircuitos
- Maniobras con corrientes inductivas o capacitivas
- Pérdida brusca de carga

- Sobretensiones por rayos en líneas aéreas
- Sobretensiones por rayos en estaciones receptoras
- Maniobras y cortocircuitos

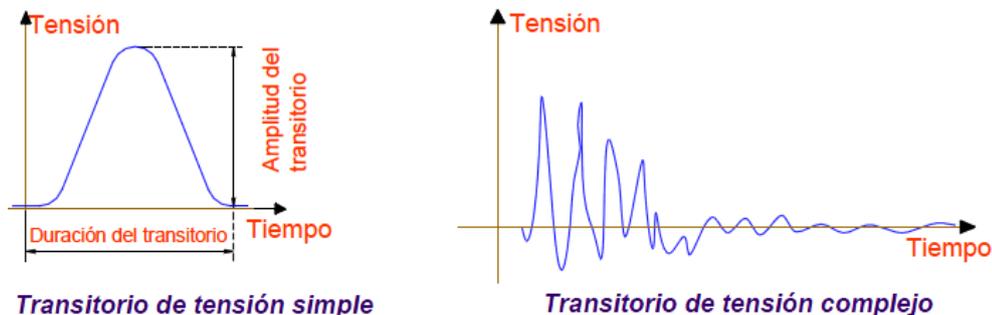


Gráfico No. 10: Transitorio simple y complejo.

Fuente: ABB, Protección contra sobretensiones⁶.

Existen también transitorios positivos y negativos independientemente de la polaridad de la descarga. En el Gráfico No. 11 se observan los transitorios positivos y negativos.

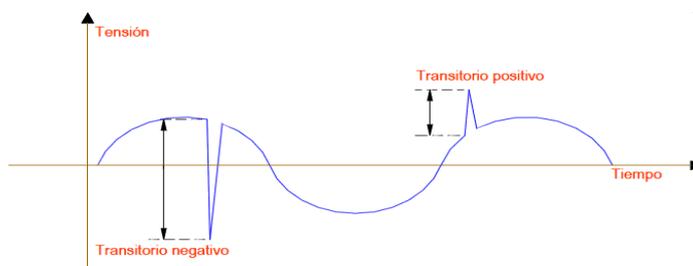


Gráfico No. 11: Transitorio positivo y negativo.

Fuente: ABB, Protección contra sobretensiones⁶.

En el Gráfico No. 12 se observa las diferentes formas de onda de los sobrevoltajes transitorios y temporales. Los sobrevoltajes temporales tienen una duración $> 200\text{ms}$ a diferencia de los transitorios que tienen una duración $< 1\text{ms}$. En el Gráfico No. 13 se diferencia de una manera

⁶ Cuaderno Técnico de ABB.

clara que los sobrevoltajes transitorios son picos de voltaje instantáneos, mientras que en la forma de onda de los temporales el pico de voltaje se extiende y se mantienen en el tiempo no mayor a 3 ciclos[4].

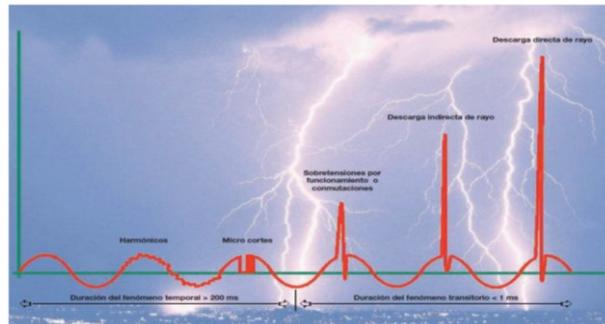


Gráfico No. 12: Onda temporal y transitoria

Fuente: ABB, Protección contra sobretensiones⁶.

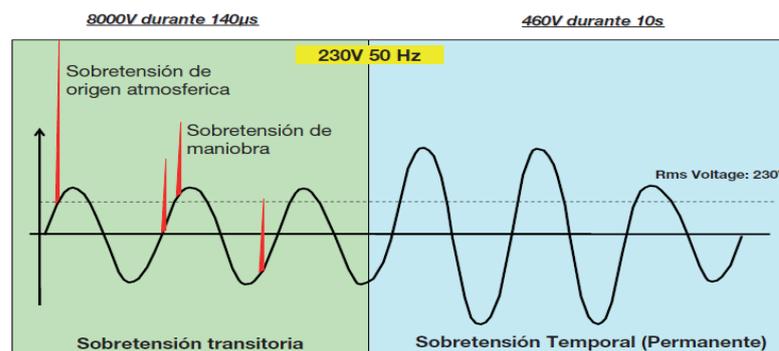


Gráfico No. 13: Onda de sobretensión transitoria y permanente.

Fuente: ABB, Protección contra sobretensiones⁶.

2.2.2 Por su Origen.

Existen 3 causas principales que producen sobretensiones por su origen que son:

- Sobrevoltajes por Maniobra
- Sobrevoltajes por Ferresonancia
- Sobrevoltaje por Descargas Atmosférica

La Tabla No. 4 describe los tipos de sobrevoltaje por su origen diferenciándolos por su tiempo duración, amplitud y amortiguación de la forma de onda.

Tabla No. 4: Sobrevoltajes Según su Origen.

Tipo de Sobrevoltaje(causa)	Amplitud Del Sobrevoltaje MV-HV	Duración	Amortigua_miento
Atmosférica (caída de rayo)	>4	Muy corta 1 a 10ms	Fuerte
De Maniobra (interrupción de cortocircuito)	2 a 4	Corta 1ms	Medio
A frecuencia Industrial (defecto aislamiento)	$<\sqrt{3}$	Larga > 1s	Débil

Fuente: D. Fulchiron, Sobrevoltaje y Coordinación de aislamiento en medio y alto voltaje.⁷

a) Sobrevoltaje por Maniobra

Se produce por la conexión o desconexión de equipos en la red, estos sobrevoltajes se producen en lugares en el que se realiza la maniobra.

Una maniobra se le considera a la apertura y cierre de interruptores, o también estos sobrevoltajes ocurren al conectar o desconectar equipos en subestaciones. Un sobrevoltaje por maniobra se produce cuando existe un cambio en las condiciones de operación en la red.

Existen 2 tipos de sobrevoltajes transitorios por maniobra estos son:

- Conexión y desconexión de una línea de distribución y transformador como una unidad.
- Conexión y desconexión de un capacitor.

⁷ Cuaderno Técnico Schneider N° 151.

i. Conexión y desconexión de una línea de distribución y transformador como una unidad.

La maniobra de energización de transformadores puede ocasionar valores de sobrevoltajes altos debido a la característica no lineal del núcleo, presentan transitorios electromagnéticos debido al flujo residual al momento de la energización del transformador en vacío y en algunas condiciones como eliminación de fallas.

También se produce un sobrevoltaje cuando un transformador con carga ligera o descargada es conectado o desconectado remotamente a través de un cable o línea aérea larga o con un banco grande de capacitores [5]. Los eventos anteriormente nombrados comúnmente ocurren en líneas de transmisión pero bajo los siguientes parámetros pueden ocurrir también en sistemas de distribución.

- Cuando un Reconector es accionado sobre el terminal de una línea con un gran transformador después de una falla temporal que ocurre durante condiciones de carga ligera.
- Cuando un banco grande de capacitores se localiza en el lado primario de un transformador y ambos son conectados o desconectados como una unidad (Gráfico No. 14), el cual se lo puede representar mediante su circuito equivalente que se observa en el Gráfico No. 15.

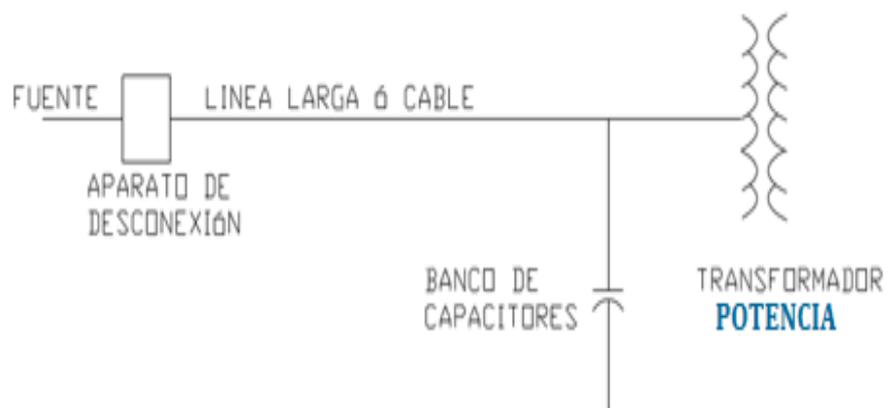


Gráfico No. 14: Diagrama de sistema en que un transformador energizado puede introducir sobrevoltajes.

Fuente: Copper Power Systems. Electrical System Protection

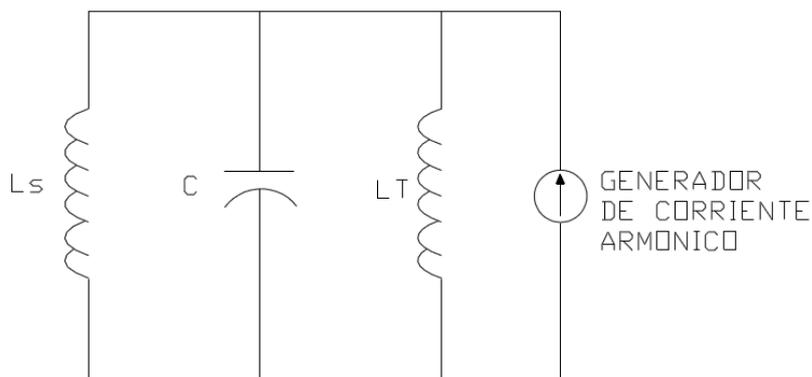


Gráfico No. 15: Circuito equivalente para el análisis del sistema

Fuente: Copper Power Systems, Electrical System Protection

Donde:

Ls = Inductancia del sistema.

LT = Inductancia del transformador.

C = Capacitancia entre el aparato de desconexión y el transformador.

Si la combinación paralela de Ls, LT y C es resonante en el segundo y cuarto armónico, pueden desarrollarse los sobrevoltajes.

ii. Conexión y desconexión de un banco de capacitores.

Durante el cierre de capacitores el fenómeno fundamental es el almacenamiento de energía. La apertura de estos equipos puede presentar altos sobrevoltajes ocasionados por la carga almacenada en los capacitores, otra de las causas es por la reenergización de capacitores no descargados [6].

Si se considera la energización del banco de capacitores con neutro aterrizado del Gráfico No. 16. Si las condiciones iniciales (pre-cierre) son tales que el banco de capacitores no tiene carga (sin voltaje) y el voltaje del sistema cierra en un máximo, el voltaje se excederá como se muestra en el Gráfico No. 17.

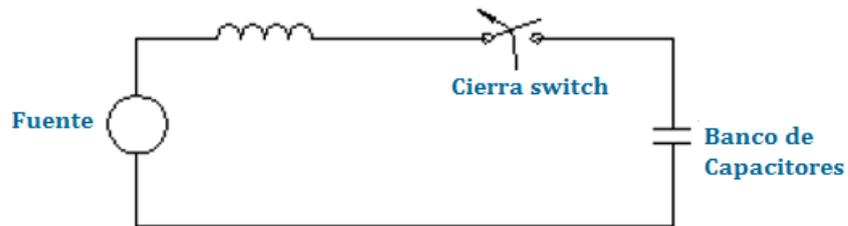


Gráfico No. 16: Energización de un banco de capacitores.

Fuente: Copper Power Systems, Electrical System Protection

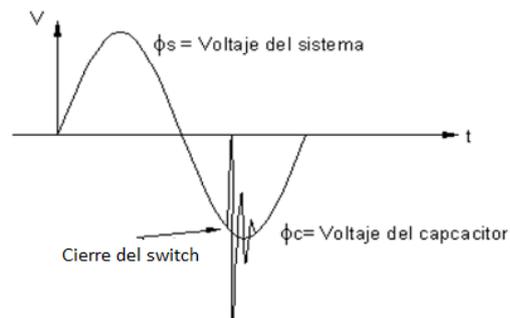


Gráfico No. 17: Onda de sobrevoltaje conexión de banco de capacitores.

Fuente: Copper Power Systems, Electrical System Protection

En el Gráfico No. 18 se observa el circuito equivalente de la desconexión de un banco de capacitores [6].

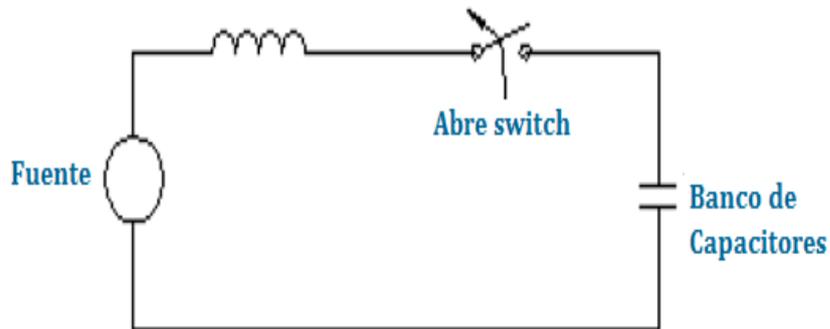


Gráfico No. 18: Desconexión de un banco de capacitores.

Fuente: Copper Power Systems, Electrical System Protection

En el Gráfico No. 19, la corriente de estado estable de 60 Hz. se adelanta al voltaje de la fuente en 90° , tal que el voltaje de la fuente y el voltaje del capacitor alcanzan su valor máximo en el tiempo (ver en el punto a de la Gráfico No. 19)

El resultado de la interrupción es que el voltaje del capacitor permanecerá en el valor pico puesto que la carga queda atrapada en él. Sin embargo, la fuente de voltaje continua su variación normal de 60 Hz y el voltaje que gradualmente aparece alrededor del switch es la diferencia entre el voltaje fijo del capacitor por un lado y el voltaje de la fuente en el otro. Como se ve, el voltaje de la fuente alcanza un máximo de 2 veces el valor normal en el punto e del Gráfico No. 19, medio ciclo después de la interrupción [6].

Si el switch puede resistir 2 veces el voltaje normal en este tiempo, se obtiene una interrupción exitosa. A causa de sus resistores de descarga normalmente incluidos en los capacitores, el voltaje del capacitor se descargará totalmente hasta desaparecer.

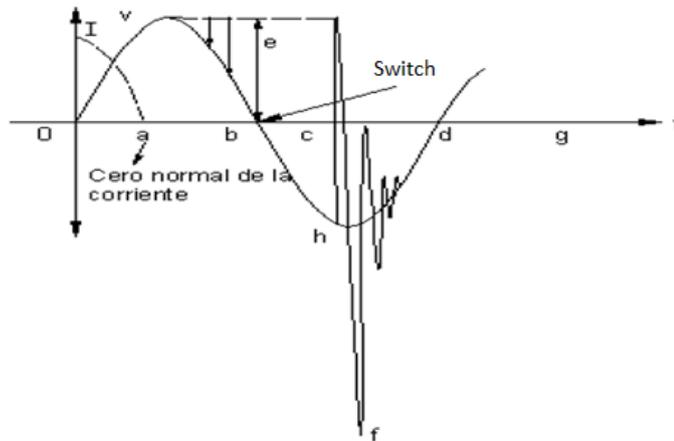


Gráfico No. 19. Onda de sobrevoltaje por desconexión de banco de capacitores

Fuente: Copper Power Systems, Electrical System Protection

b) Sobrevoltaje por Ferroresonancia

El fenómeno de resonancia ocurre cuando un circuito que está conformado por inductores y capacitores es alimentado por un voltaje con una frecuencia aproximadamente igual a la frecuencia natural del sistema, en este caso existiría un único punto de resonancia[5].

La ferroresonancia es un fenómeno no lineal, ya que al existir una inductancia variable ocasiona una resonancia en varios puntos y así una mayor probabilidad de ocurrencia, ya que esto provoca la presencia de armónicos en las redes de distribución como también sobrevoltajes transitorios o permanentes.

Puede producirse ferroresonancia debido a diversos eventos como son:

- Cuando los circuitos capacitivos son energizados en serie con los devanados de un transformador.
- Cuando un condensador es puesto en serie con el devanado primario de un transformador de distribución.

En la Gráfico No. 20 se observa el circuito que representa la ferresonancia cuando una reactancia capacitiva queda en serie con una reactancia inductiva (devanado de un transformador) [5]

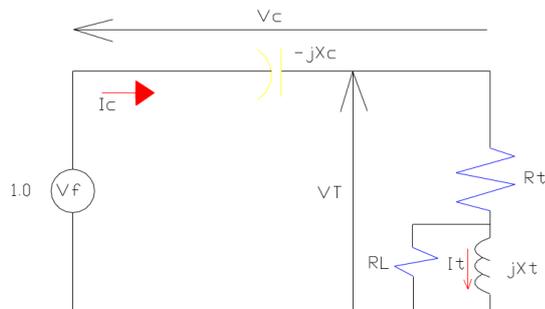


Gráfico No. 20: Circuito Ferresonante en serie.

Fuente: D. Montaluisa; Analisis de Coordinación de Aislamiento para Primarios de Distribución.

Donde:

X_c = La reactancia capacitiva de la línea

$R_t + jX_t$ = Impedancia del transformador

X_t = Reactancia de magnetización

R_L = Resistencia resonante

V_f = Voltaje de la fuente

V_T = Voltaje en los terminales del transformador

I_c = Corriente que pasa por la reactancia capacitiva

V_c = Voltaje que pasa por la reactancia capacitiva

I_t = Corriente de Magnetización

En el Gráfico No. 21 se observa la forma de onda de sobrevoltaje a frecuencia industrial, se debe considerar que la forma de onda depende del tipo de evento que se produce en el sistema de distribución [5].

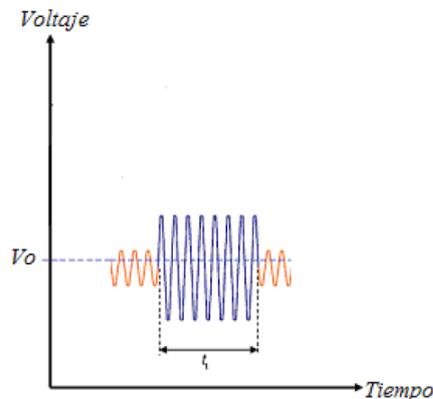


Gráfico No. 21: Forma de onda de sobrevoltaje a frecuencia industrial.

Fuente: D. Montaluisa; Analisis de Coordinación de Aislamiento para Primarios de Distribución

La característica principal de un sobrevoltaje a frecuencia industrial es su duración que es relativamente larga con una frecuencia cercana a la fundamental y su amplitud es inferior a los demás sobrevoltajes.

c) Sobrevoltaje de Origen Atmosférico

Los fenómenos de sobrevoltaje más frecuentes en las redes eléctricas son originados por fenómenos externos como son las descargas atmosféricas. Este tipo de fenómenos transitorios son los más severos ya que alcanzan grandes valores de voltaje lo cual es perjudicial para el aislamiento de los equipos que están conectados a la red como también ocasionan cortes de suministro de energía por la actuación de las protecciones de sobrecorriente.

Los sobrevoltajes de origen atmosférico son producidos por los efectos del rayo que al caer directo o en un punto cercano de la línea aérea da lugar a una onda viajera de sobrevoltaje, que se divide buscando la forma más rápida de descargarse a tierra a lo largo de la línea y su magnitud puede ser mayor al Nivel Básico de Aislamiento (BIL).

2.2.3 Descargas Atmosféricas

Para el análisis y el estudio de los sobrevoltajes originados por descargas atmosféricas, el factor más importante a ser considerado es el rayo ya que contiene una gran cantidad de energía y altos valores de voltaje por ende se considera una fuente de corriente, que puede tener polaridad positiva, negativa o ambas, a la cual se la llama onda bipolar.

La única nube que tiene la capacidad para originar un rayo es la “Cumulus Nimbus”, que tiene forma reconocible a la distancia, es detectable por los radares meteorológicos y muestra un color gris muy oscuro, casi negro, en su parte baja que impide el paso de la luz solar[7].

En la Gráfico No. 22 se detallan algunas características de la nube Cumulus Nimbus.

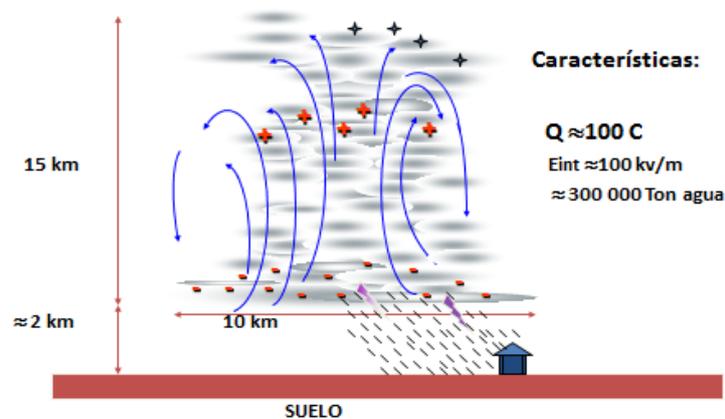


Gráfico No. 22: Características de la Nube Cumulus Nimbus.

Fuente: Congreso de Protecciones de Sobrevoltaje

De los registros estadísticos de las descargas atmosféricas a nivel mundial se conoce que del 100% de descargas, el 50% son nube – nube, del 30 al 40 % son nube – tierra y el 10% restante son nube – aire; por otra parte se conoce también que de las descargas nube tierra del 80 al 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-Nieve) 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)[8].

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 el Gráfico No. 23 se muestran las cuatro categorías de rayos [6].

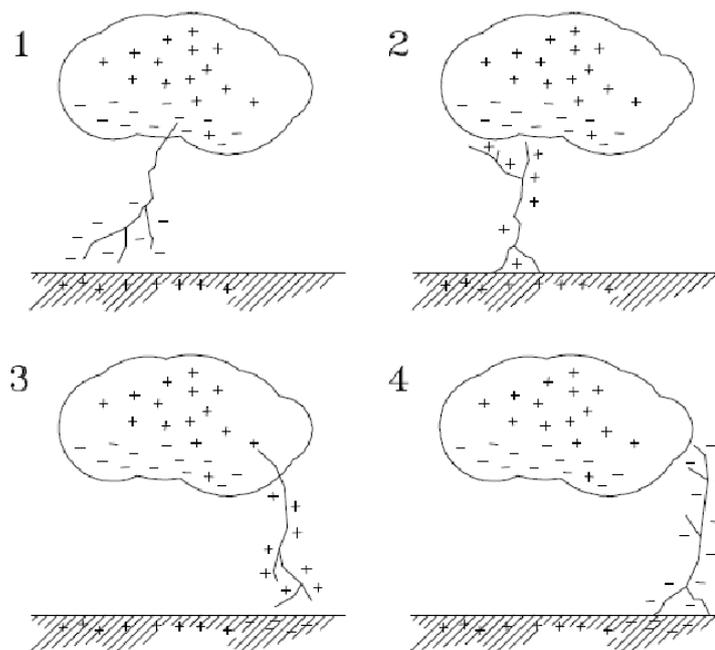


Gráfico No. 23: Tipos de rayos entre nube y tierra.

Fuente: Copper Power Systems, Electrical System Protection

2.2.3.1 Efectos de las Descargas Atmosféricas

Al producirse una descarga nube - tierra tanto descendente como ascendente se puede evidenciar diferentes efectos, 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:

a) Sobrevoltaje por Carga Estática

Este efecto se le clasifica como un sobrevoltaje externo⁸ 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.

b) Sobrevoltajes 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 la enorme cantidad de energía, que trae consigo una descarga atmosférica. Las corrientes que se presentan por este tipo de descarga, pueden alcanzar valores hasta de 200 kA instantáneos con frentes de onda muy alto que introducen enormes esfuerzos dinámicos y térmicos en las instalaciones. Por lo general una descarga directa sobre un punto intermedio de una línea de transmisión provoca una onda de sobrevoltaje inicial que se divide en dos ondas viajeras con una velocidad cercana a la de la luz. Este tipo de sobrevoltajes afectan a los aislamientos de las instalaciones, particularmente a los equipos instalados a lo largo de las líneas de distribución como son los transformadores, reconectadores, seccionalizadores, etc., como también a los equipos y máquinas de los usuarios de la red en el lado de bajo voltaje, por lo que se encuentran expuestos a esfuerzos dieléctricos que superan el BIL, produciendo la

⁸ Los sobrevoltajes externos son los producidos por efectos del ambiente es decir por descargas atmosféricas y son efectos externos a fallas del sistema.

ruptura por perforación del material dieléctrico. En el Gráfico No. 24 se puede observar una descarga directa a la línea de distribución [9].

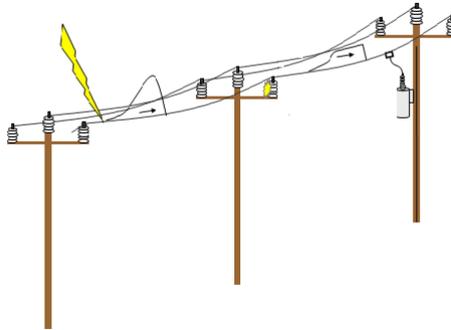


Gráfico No. 24: Descarga directa de un rayo.

Fuente: Jonathan Woodworth, What is the Value of a Distribution Arrester

c) Sobrevoltajes 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 200m). El cambio brusco del campo electromagnético producido por la circulación de la corriente de retorno induce en la línea una sobretensión. Este tipo de voltaje es el más frecuente y puede ser grave dependiendo de la intensidad de descarga, ya que de mediciones realizadas en el campo se sabe que los sobrevoltajes son del orden de 100 y hasta 200 kV con corrientes de 25 a 100 kA. Las descargas indirectas son las que más afectan a las instalaciones de mediana y baja tensión de orden de: 4.16, 13.8, 24.9, 34.5 kV.

El voltaje pico inducido en una línea de distribución debido a descargas que caen cerca de ella es una función de los siguientes parámetros:

- El pico y el tiempo de pico (cresta) de la corriente de descarga de retorno.
 - ✓ La velocidad de la descarga de retorno.
 - ✓ La altura de la línea.

- ✓ La distancia perpendicular del punto de descarga hasta la línea.

Cuando la descarga de paso escalonado desciende hacia la línea, este alcanza un punto conocido como “punto de disrupción”. En este punto se iniciará una unión con la línea o una unión con la tierra, dependiendo de la distancia crítica conocida como “distancia disruptiva”.

Si en el punto de disrupción, el strikes⁹ está más aproximado a tierra que al conductor, el strikes del rayo impactará la tierra. Si el strikes está más ajustado al conductor, la línea será golpeada directamente. Una distancia perpendicular de la descarga a la línea, induce un voltaje más bajo a ella. Por lo tanto, la distancia de disrupción es un parámetro necesario para la estimación del rango de salidas de una línea de distribución. En el Gráfico No. 25 se observa una descarga indirecta a la línea ya que impacta al árbol que se encuentra cercano a la línea.

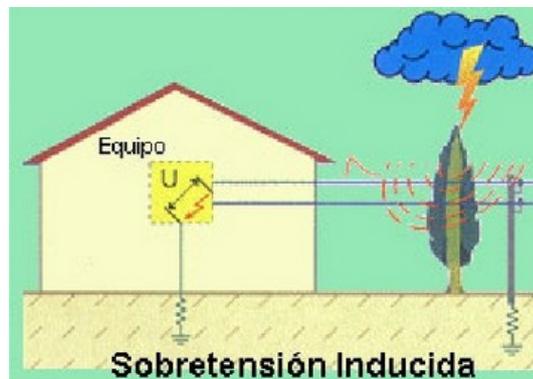


Gráfico No. 25: Descarga indirecta de un rayo.

Fuente: Manuel Rodríguez, Hugo Zavala. Estudio de Descargas Atmosférica y determinación de Índices de Riesgos¹⁰

⁹ Escalón Tipo o líder es el primer rayo que se produce en la descarga atmosférica ya que son varios rayos simultáneos,

¹⁰ Slideshare [2013], Estudio de Descargas Atmosférica y determinación de Índices de Riesgos.

La corriente del rayo alcanza valores instantáneos extremadamente altos que someten a los elementos de la instalación a esfuerzos dinámicos y térmicos lo que requieren para su disminución de un diseño adecuado de un sistema de tierra.

La corriente del rayo trae consigo una gran cantidad de energía calorífica alcanzándose temperaturas de hasta 8350°C que provocan la fusión de los conductores y aislamientos[8].

Las descargas indirectas también producen un efecto capacitivo, debido al acoplamiento capacitivo del aire a las líneas aéreas, lo cual introduce transitorios de corriente en las líneas más cercana dando lugar a sobrevoltajes, como se muestra en la Gráfico No. 26a).

Otro efecto que se evidencia en las descargas indirectas es mediante el acoplamiento inductivo, debido a las altas corrientes que se originan durante el rayo y al existir el aire como medio de acoplamiento magnético, como se muestra en el Gráfico No. 26b).

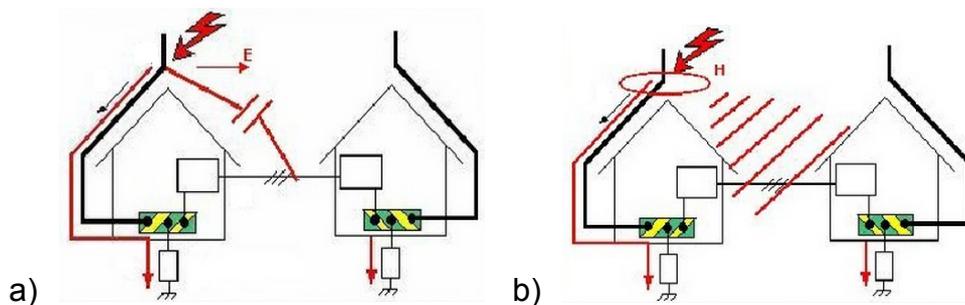


Gráfico No. 26: Efectos de un sobrevoltaje por descargas indirectas.

Fuente: Manuel Rodríguez, Hugo Zavala. Estudio de Descargas Atmosférica y determinación de Índices de Riesgos¹⁰

d) 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, apareciendo una diferencia de potencial suficiente para producirse flameo entre el poste y los conductores. Este flameo es conocido como flameo inverso (Blackflashover) debido a que su dirección es contraria a lo esperado para una descarga directa a los conductores, lo que produce fallas fase tierra, como se observa en el Gráfico No. 27.

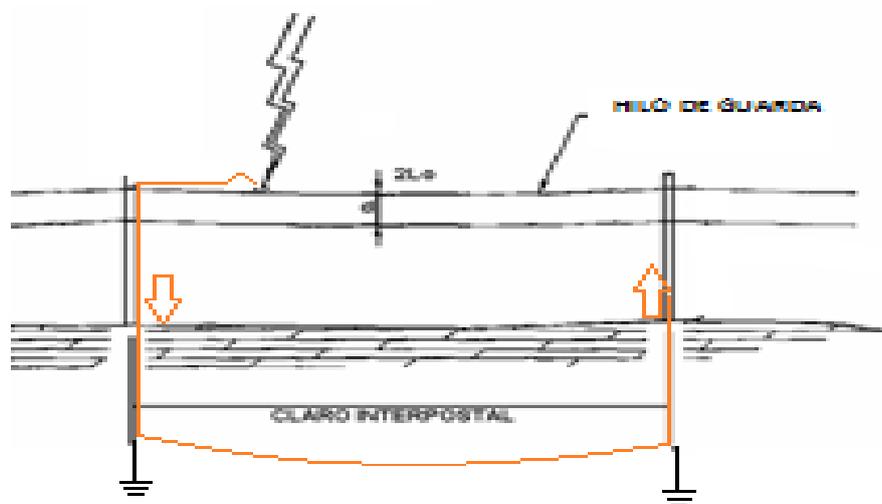
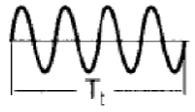
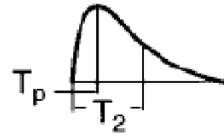
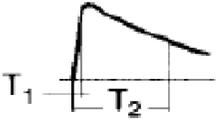


Gráfico No. 27: Sobrevoltaje por Flameo Inversa.

Fuente: Autoría Propia

En la Tabla No. 5 se describe las clases de sobrevoltajes, su forma de onda frente de onda, duración y normalización de las mismas.

Tabla No. 5: Tipos de formas de onda y sus características.

Clase de Sobrevoltajes	Baja frecuencia		Transitorios	
	Permanente	Temporal	De frente Lento	De frente Rapido
Forma				
Gama de Formas (Frecuencia, frente de subida, duración)	f=50Hz o f=60Hz T _t ≥3600 s	10Hz<f<500Hz 3600s≥T _t ≥0.03s	5000 μs>T _p >20 μs T ₂ ≤20 μs	20 μs≥T ₁ >0.1 μs T ₂ ≤300 μs
Forma Normalizada	f=50Hz o f=60Hz T _t (*)	48 Hz≤f≤62Hz T _t =60 s	T _p =250 μs T ₂ =2500 μs	T ₁ =1.2μs T ₂ =50 μs
Ensayo de voltaje soportada normalizada	(*)	Ensayo a frecuencia industrial de corta duración	Ensayo de impulso tipo maniobra	Ensayo de impulso tipo rayo
(*) A especificar por el comité del producto considerado.				

Fuente: D. Montaluisa; Analisis de Coordinación de Aislamiento para Primarios de Distribución [5]

2.2.4 Probabilidad de Caída de Rayos en las Redes Aéreas,

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 empírica [10].

Las líneas aéreas reciben descargas por 100 km de línea, según la relación empírica encontrada por Eriksson.

$$N = 0.10 N_g * (b + 28 * H^{0.6}) \quad \text{Ec. 5}$$

Dónde.

H: Altura de la línea [m]

b: Ancho de la línea [m]

N_g : Densidad de descarga a tierra [$\frac{\text{descargas}}{\text{Km}^2 \text{por}} \text{año}$].

Donde la densidad de descargas a tierra, está relacionado al nivel ceraúnico por la siguiente relación según la GIGRE:

$$N_g = 0.04 * (Td)^{1.25} \frac{\text{descargas}}{\text{Km}^2 \text{por}} \text{año} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

T_d : Nivel ceraúnico [$\frac{\text{descargas}}{\text{Km}^2 \text{por}} \text{año}$]

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 niveles ceraúnico se los representa a través del mapa ceraúnico, cabe recalcar que cada país tiene su propio nivel ceraúnico.

En el Gráfico No. 28 se observa el mapa ceraúico del Ecuador donde representa el número de descargas atmosféricas que se producen al año en el Ecuador y cada una de sus provincias [11].

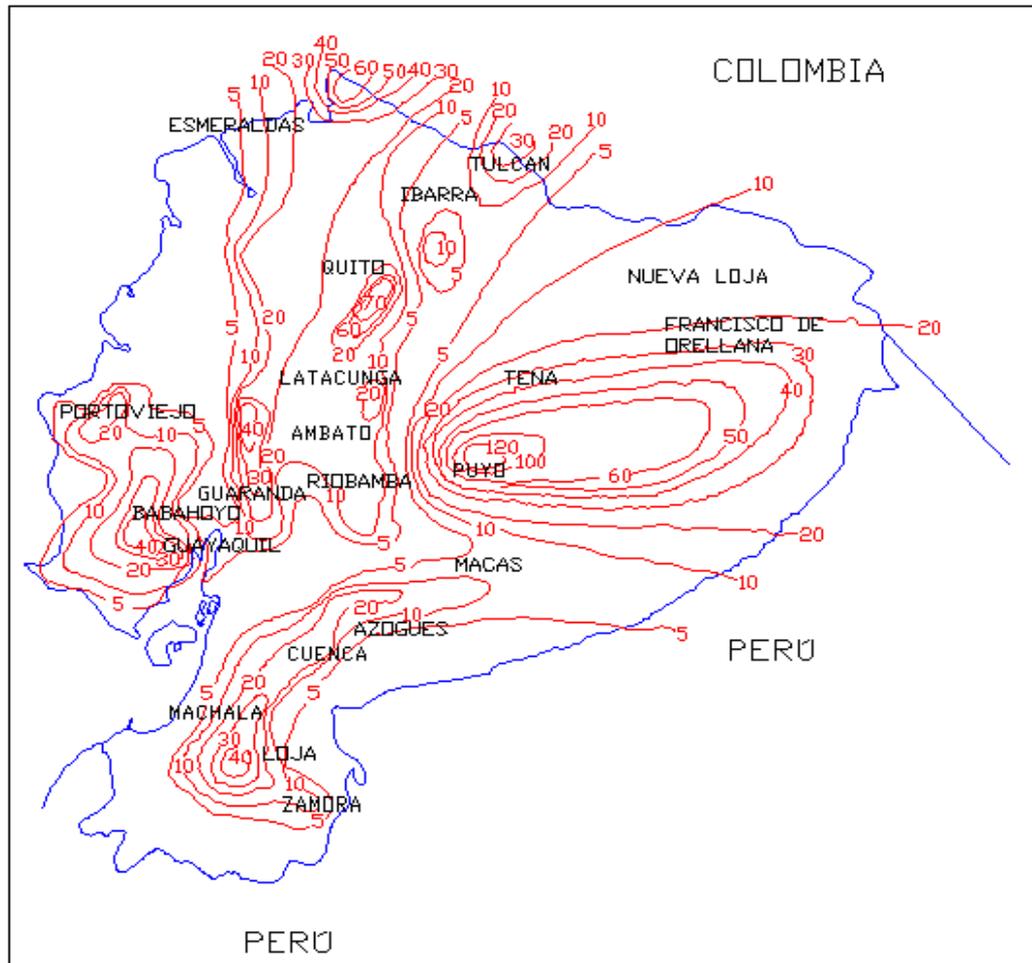


Gráfico No. 28: Mapa del Nivel Ceraúico del Ecuador.

Fuente: F. Echeverria y E. Preciado, Estudio de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad en Subestaciones del Sistema de Nacional de Transmisión.

2.3 Ondas Viajeras

En los conductores de las redes eléctricas se pueden generar ondas reflejadas (V_r) y ondas refractadas (V_t) cuando una onda incidente (V_i)

alcanza una alteración brusca de los parámetros eléctricos del circuito, como un terminal abierto ó la unión de dos líneas con diferentes impedancias características, esta onda incidente puede ser ocasionada por una descarga atmosférica, esta onda tiende a dividirse en dos ondas incidentes dirigiéndose a cada lado del conductor, como se puede observar en el Gráfico No. 29 [9].

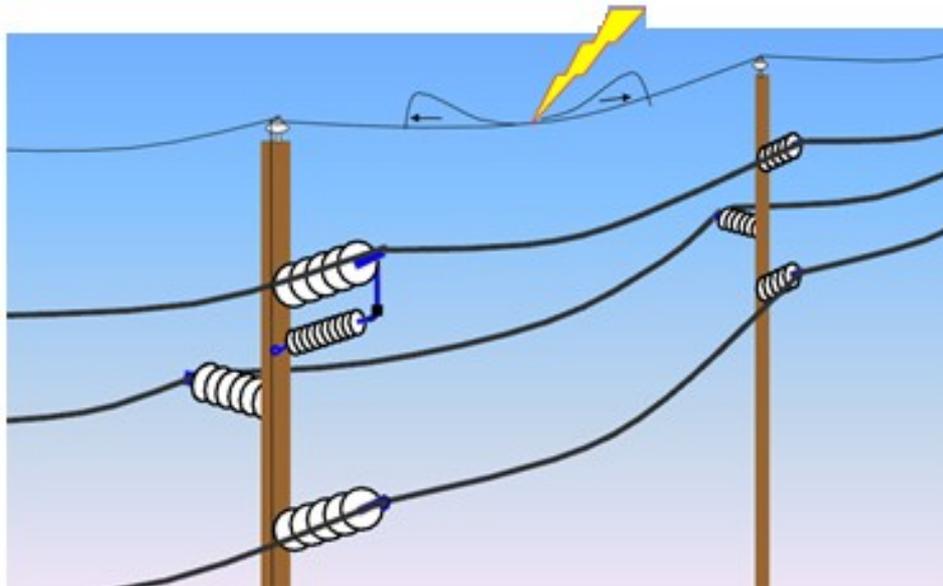


Gráfico No. 29: Onda viajera en líneas aérea

Fuente: Jonathan Woodworth, What is the Value of a Distribution Arrester

Cuando una de las ondas incidentes llega al cambio de impedancia se divide en una onda reflejada (V_r) y en una onda refractada (V_t), la onda reflejada se dirige en dirección contraria a la dirección de la onda incidente, en cambio la onda refractada sigue con el mismo sentido pero cambiada su magnitud; la magnitud de estas ondas dependerá de los valores de impedancia características propia de cada línea[12].

Otro caso es cuando la onda incidente llega a un punto abierto en el circuito, resultando la reflexión total de la onda, enviando de regreso una onda de voltaje igual a la onda de llegada, duplicando el voltaje [6], como se observa en el Gráfico No. 30.

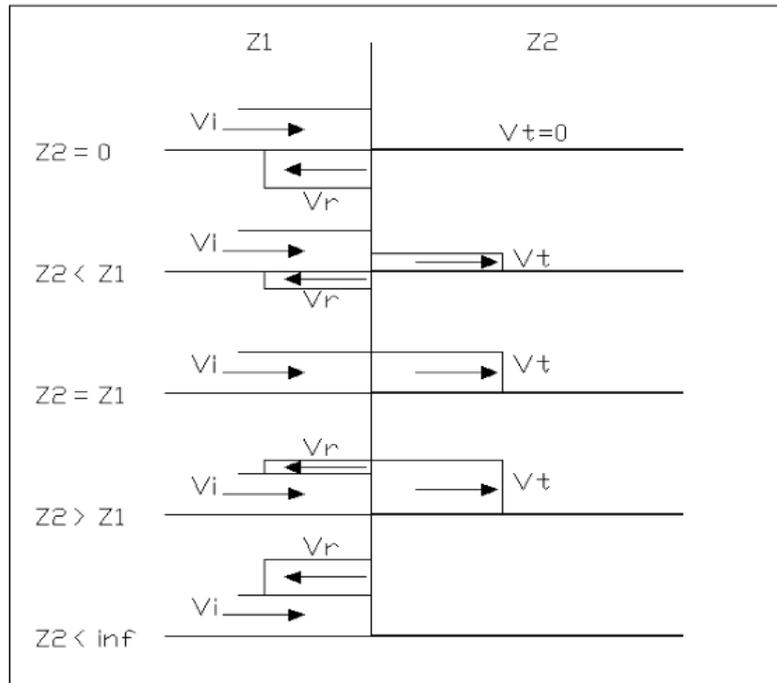


Gráfico No. 30: Ondas viajeras para diferentes eventos.

Fuente: Copper Power Systems, Electrical System Protection

Como se observa en el Gráfico No. 30 existen diferentes casos como cuando $Z2 = 0$ la onda de voltaje se refleja con signo contrario, cancelando a la onda de voltaje. Cuando la onda incidente pasa de una línea de elevada impedancia característica a una de menor impedancia ($Z2 < Z1$) origina una reducción de la onda de voltaje ya que parte se refleja con signo negativo y otra parte sigue la dirección original. Al contrario, cuando la onda pasa de una línea de pequeña impedancia a una de mayor impedancia ($Z2 > Z1$) la onda reflejada retorna con signo positivo sumándose con la onda incidente y aumentando el voltaje. Cuando las impedancias características son iguales ($Z2 = Z1$) no ocurre ninguna división de la onda incidente. Cuando la $Z2 = \text{inf}$. la onda incidente es reflejada con signo positivo aumentando el voltaje al doble [12].

CAPÍTULO III

PROTECCIÓN DE SOBREVOLTAJE EN LÍNEAS AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN.

Los equipos que componen las redes eléctricas de distribución tienen un límite máximo de voltaje de impulso (BIL) que pueden tolerar, esto en función a la rigidez dieléctrica de los materiales y a la distancia de fuga entre puntos vivos y tierra, razón por lo cual se debe protegerlos frente a cualquier transitorio de sobrevoltaje que puedan sobrepasar el BIL y dañar a estos equipos, para lograr este objetivo existen 2 métodos: uno es aumentando el BIL¹¹ del equipo y otro es limitando la magnitud del pico de voltaje que puede llegar al equipo, en la actualidad el segundo método es el más efectivo y menos costoso por lo tanto el más utilizado.

3.1 Protección de Equipos y Líneas con Descargadores

Los descargadores o “Surge Arresters” son el dispositivo mayormente utilizado desde sus inicios por los años 1890 como elemento de protección de las líneas del telégrafo, el cual fue patentado por Elihu Thomson y Alexander Wurts (Gráfico No. 31); desde entonces se han desarrollado múltiples variantes al diseño inicial tanto en número de componentes como en los materiales utilizados pero la filosofía de operación se mantiene. Su operación y uso se determina en la norma ANSI-IEEE C62.1/C62.22.

¹¹ BIL.- Nivel Básico de Aislamiento

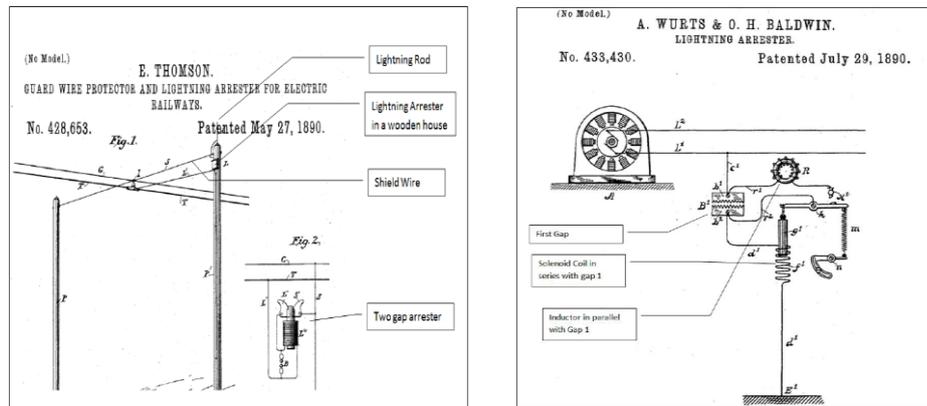


Gráfico No. 31: Primer descargador utilizado en las líneas de distribución.

Fuente: Jonathan Woodworth, History of Arresters on Power Systems
1750 – 1890 (Arrester Works).

Los descargadores han sido diseñados para tener la capacidad de:

- Soportar el voltaje a frecuencia industrial a la cual están instalados
- Descargar cualquier tipo de energía transitoria a tierra, para evitar un excesivo voltaje a través del equipo que se protege.
- Operar en el mismo ambiente del equipo que va a proteger.
- Garantizar los puntos anteriores al más bajo costo.

El Gráfico No. 32 muestra el margen de protección de un descargador con respecto al aislamiento del equipo al que protege mediante las curvas del voltaje a lo largo del tiempo, estas curvas son muy utilizadas para la Coordinación de Aislamiento de los Sistemas Eléctricos tanto en líneas de distribución como en líneas de Transmisión [5].

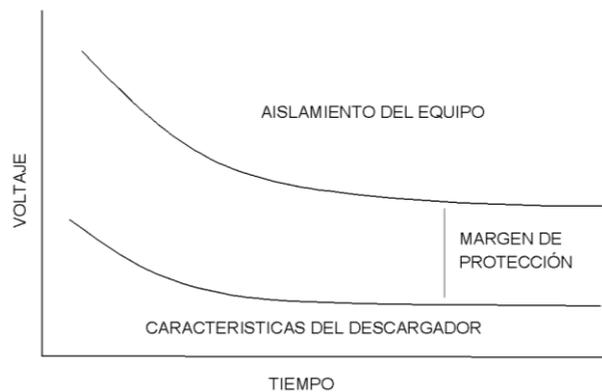


Gráfico No. 32: Nivel de protección de los descargadores para la coordinación de aislamiento.

Fuente: D. Montaluja; Analisis de Coordinación de Aislamiento para Primarios de Distribución

3.1.1 Clasificación de los Descargadores por su Construcción.

En las últimas décadas se ha evidenciado la transición de las tecnologías de los materiales utilizados en los descargadores para las líneas de distribución, dentro de los cuales se tiene:

- Descargadores de Carburo de Silicio (**SiC**) con y sin explosores (gaps).
- Descargadores de óxido metálico (**ZnO**) sin explosores.

a) Descargadores de Carburo de Silicio

Los descargadores de Carburo de Silicio (SiC) llamados generalmente como “valvulares”, están constituidos por cápsulas o discos compuestos de resistencias no lineales en serie que actúan como limitadores de corriente, estos discos se montan a una cierta distancia del electrodo superior formando así una cámaras de vacío a lo que se denomina (Gap) y finalmente se instala una bobina magnética en serie para eliminar los arcos que puedan producirse, como se puede mostrar en la en el Gráfico No. 33.

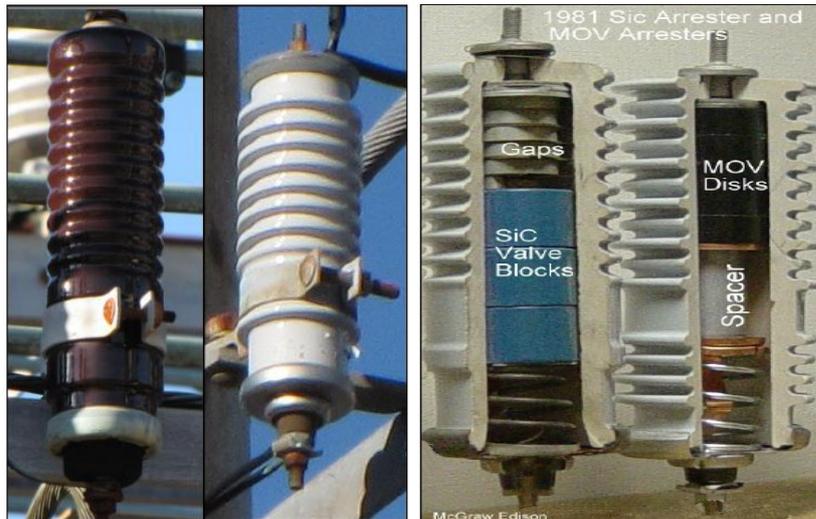


Gráfico No. 33: Diferencia en la Construcción y Curva de Operación de los Descargadores SiC y ZnO.

Fuente: Jonathan Woodworth, History of Arresters on Power Systems 1965 - Present (Arrester Works).

a.1) Conexión de Descargadores (SiC) Con Explosores.

El uso de este esquema sin conexión sólida entre la línea de MV y el descargador, en los cuales la única manera de conectarse con el descargador es mediante la ionización del aire, como se muestra en la Gráfico No. 34a), esto es una de las ventajas de este esquema debido a que evita un cortocircuito franco a tierra por fallas internas en el descargador.

a.2) Conexión de Descargadores (SiC).Sin Explosores

Este esquema con una conexión sólida de la línea de MV y el descargador como se muestra en Gráfico No. 34b), se usa generalmente en redes eléctricas con alta ocurrencia de sobrevoltajes a frecuencia industrial, debido a que su curva de operación inicia en voltajes cercanos al voltaje del sistema y se generan bajas corrientes, con lo cual la energía

que soporta el descargador es baja y esto disminuye la probabilidad de falla definitiva del descargadores.

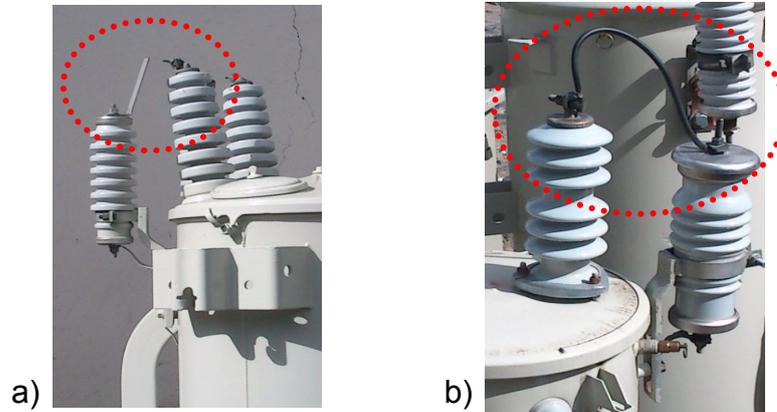


Gráfico No. 34: Descargadores de SiC a) con gaps y b) sin gaps

Fuente: Autoría Propia¹²

b) Descargadores de Óxido Metálico (ZnO)

Los descargadores de óxido metálico, constituidos básicamente por óxido de zinc compactado en forma de capsulas, han constituido un avance revolucionario en la protección de los sistemas eléctricos, cuyo nombre completo es Supresor de Varistores de Óxido Metálico MOV (Del Ingles Metal Oxido Varistor).

La estructura típica de un MOV, consta de la unión de billones de partículas de tamaño inferior a los 10 micrómetros, conductoras en alto grado que por lo general son de óxido de zinc, (**ZnO**) suspendidas en un material semiconductor, tal como se observa en el Gráfico No. 35. En función del proceso de fabricación se diferencian el tamaño de las particulares de óxido metálico, así como también el espesor y la resistividad del material semiconductor [13].

¹² Las fotografías se tomaron en la EEASA

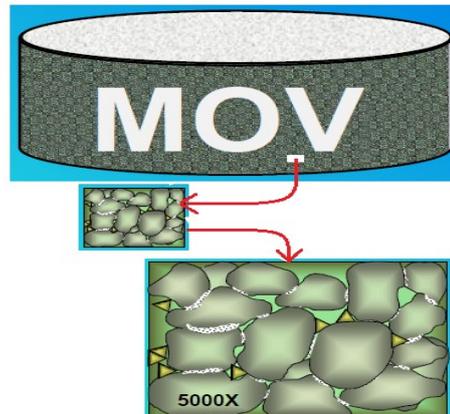


Gráfico No. 35: Bloque de un Varistor de Óxido Metálico

Fuente: Arrester Works, What is a Lightning Arrester

Esta estructura da al varistor las propiedades de un par de diodos zener conectados en antiparalelo es decir que el arreglo conduce en ambos sentidos, además de esta característica, es necesario que el material MOV sea capaz de absorber pérdidas de energía durante la conducción, la capacidad promedio de absorción de energía de un varistor convencional de ZnO es alrededor de $150 \text{ a } 200 \text{ J} - \text{cm}^3$, los recientes adelantos logrados en la tecnología MOV son aquellos que son capaces de absorber de 4 a 5 veces más energía por volumen que la indicada anteriormente. En el Gráfico No. 36 se observa el esquema de construcción de un descargador de ZnO [13].

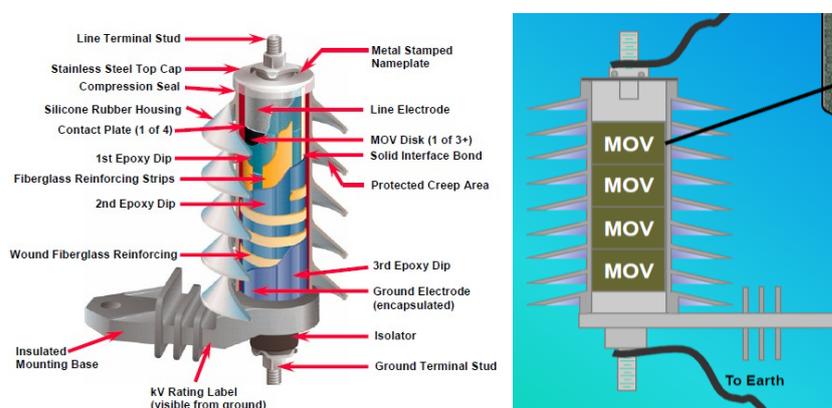


Gráfico No. 36: Partes constructivas de un descargador de ZnO

Fuente: Arrester Works, What is a Lightning Arrester

3.1.2 Régimen de Operación de los Descargadores de ZnO

La filosofía de operación de los descargadores es la del Switchero Electrónico On/Off, con la conducción o no conducción de billones de uniones semiconductoras que se forman entre los granos de ZnO, con tiempos de conmutación y recuperación inferiores a los microsegundos, tal como se muestra en el Gráfico No. 37 [13].

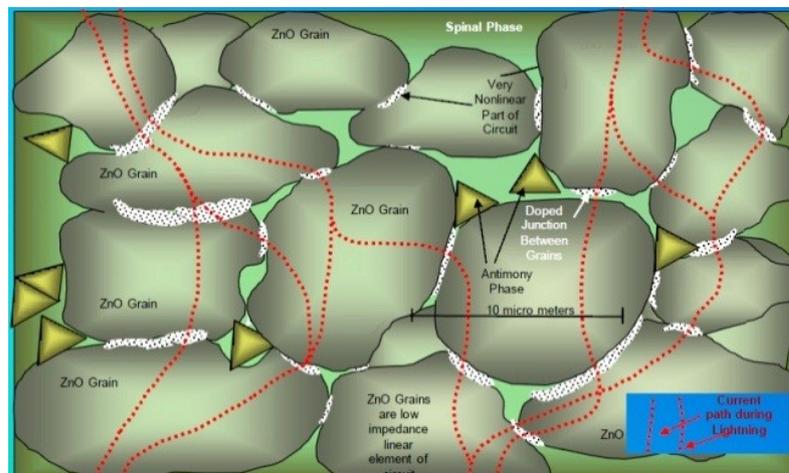


Gráfico No. 37: Operación del Descargador ZnO

Fuente: Arrester Works, What is a Lightning Arrester

Este proceso de switchero se origina cuando se supera el voltaje pico de polarización de las uniones semiconductoras, con lo que se generan billones de caminos para que las corrientes puedan fluir, es decir que el arreglo se vuelve conductor, hasta que el voltaje aplicado caiga por debajo del voltaje de polarización, tal como se puede observar en el Gráfico No. 38.

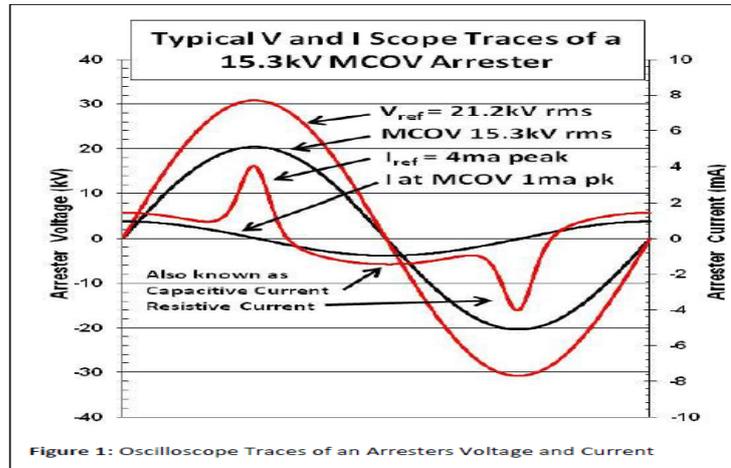


Gráfico No. 38: Voltaje y Corriente de Operación del Descargador.

Fuente: Jonathan Woodworth, Arrester Reference Voltage (Arrester Works).

En función de las características de fabricación del ZnO se determina la curva característica de voltaje vs corriente (VI) para los diferentes rangos de operación, tal como se muestra en el Gráfico No. 39.

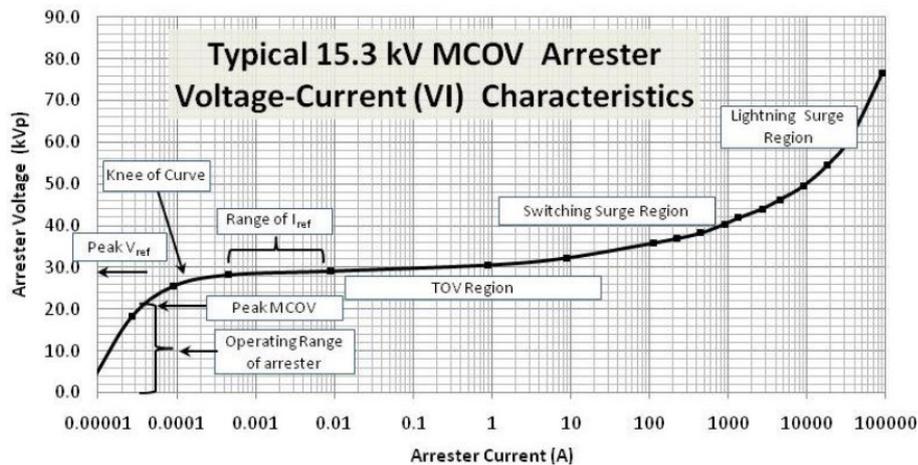


Gráfico No. 39: Curva Característica VI de Descargadores de ZnO.

Fuente: Jonathan Woodworth, Arrester Reference Voltage (Arrester Works).

En el Gráfico No. 40 se observa las curvas características de corriente vs voltaje tanto para los descargadores de SiC como para los descargadores de ZnO, en la cual se puede diferenciar el comportamiento de cada una de las tecnologías, el descargador de ZnO opera desde corrientes muy bajas que están en el orden de los mili Amper, mientras que los descargadores de SiC operan a partir de corrientes en el orden de los miles de Amperios [6].

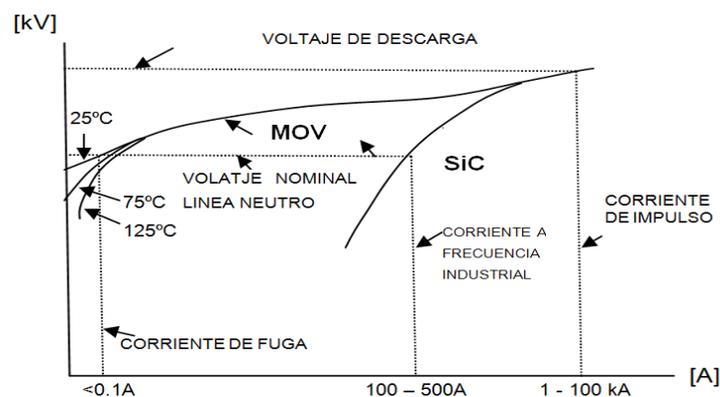


Gráfico No. 40: Curvas de Operación de los Descargadores de ZnO y SiC

Fuente: Copper Power Systems, Electrical System Protection

Otro aspecto constructivo muy importante que se debe tomar en cuenta es la energía de absorción que debe soportar el equipo frente a Máximos Voltajes de Operación Continua (MCOV)¹³, sobrevoltajes temporales (TOV¹⁴) y sobrevoltajes impulsivos como se muestra en el Gráfico No. 41; con lo que se clasifican en: Heavy Duty (trabajo duro), Normal Duty (trabajo normal) y Riser Pole (de poste de salida).

¹³ Del Ingles Maximum Continuous Operating Voltage

¹⁴ Del Ingles Temporal Over Voltage

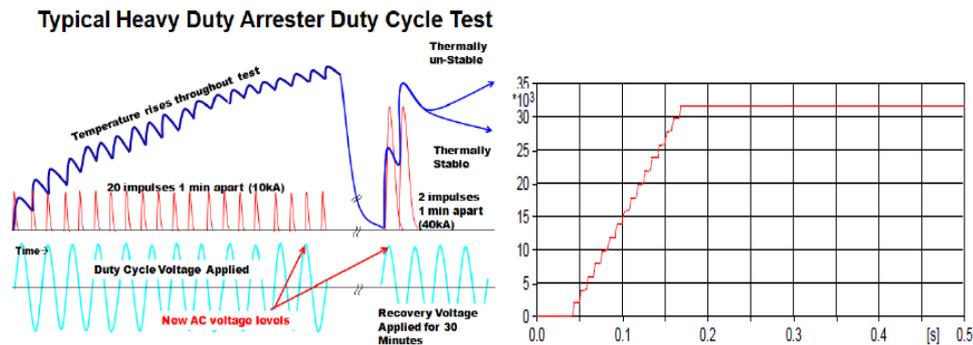


Gráfico No. 41: Energía que Soportan los Descargadores ZnO

Fuente: Jonathan Woodworth y Mike Comber, New IEEE C62.11-2012 Arrester Test Requirements (Arrester Works).

3.1.3 Clasificación de los descargadores por su Aplicación.

Los descargadores se clasifican en descargadores tipo distribución que son instalados en las redes de distribución, descargadores tipo intermedio y subestación que son usadas en las líneas de transmisión (L/T) y subestaciones (S/E) tal como se muestra en la Gráfico No. 42 [6].

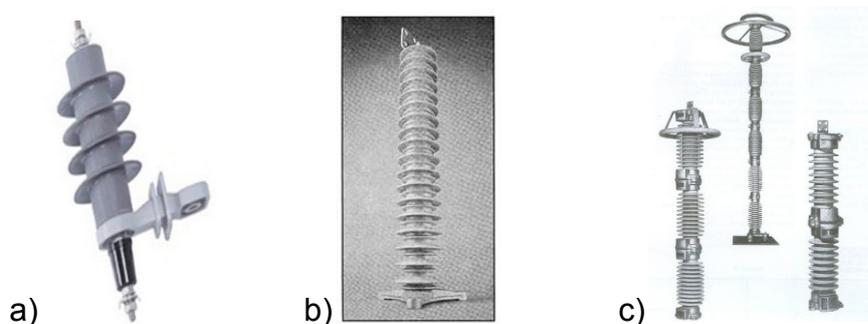


Gráfico No. 42: Tipos de Descargadores: a) Distribución, b) Intermedio y c) Estación

Fuente: Copper Power Systems, Electrical System Protection

Para la mayoría, las principales diferencias de estos tipos de descargadores son el tamaño y número de los bloques, puesto que un bloque más grande hace que se reduzca el voltaje residual e incrementa

la capacidad de disipación de energía y su confiabilidad al momento de su operación.

3.1.4 Degradación y Fallas Típicas de los Descargadores

La degradación de los descargadores de óxido de zinc (ZnO) en servicio, puede ser agrupada dentro de tres tipos, básicamente [14] degradación bajo aplicación continua de tensión A.C., degradación causada por impulsos de corriente y degradación debida a reacciones químicas con el ambiente. Es importante diferenciar la degradación de una falla, ya que la primera se encuentra relacionada con variaciones en algunas características eléctricas de los descargadores que no impiden a éstos seguir operando, mientras que una falla es una condición en la cual el descargador sufre un daño físico (ruptura o fundición) que genera una condición de no funcionamiento y por ende desprotección del equipo o sistema al cual se encuentra conectado, así como también la operación de la protección de sobrecorriente aguas arriba por el cortocircuito provocado. En un descargador se puede presentar aisladamente uno u otro fenómeno o la condición de falla como una consecuencia de la degradación del mismo.

Los descargadores de SiC presentan generalmente mayor número de fallas que los descargadores de ZnO, esto debido a la humedad que puede ingresar al gap de aire lo que puede originar corrosión y reducir el voltaje que puede soportar el gap, adicional la expansión térmica del vapor de agua bajo calor puede resultar en daños por estrés mecánico en el interior del descargador y desencadenar en fallas catastróficas durante la operación normal o con sobrevoltajes.

Por otra parte en los descargadores de ZnO las formas con mayor probabilidad de fallas son de cuatro tipos: perforación, fugas térmicas, resquebrajamientos bajo tensión y resquebrajamientos bajo presión, el

resquebrajamiento y perforación es causado por el flujo de la corriente, lo cual causa la concentración de calor provocando principalmente la expansión térmica no uniforme y estrés mecánico, la perforación es más probable en discos con baja relación geométrica y la densidad del flujo de corriente es media, mientras que el resquebrajamiento se origina con densidades de corrientes altas y en discos con mayor relación geométrica, cabe indicar también que la perforación y el resquebrajamiento no se originan en corrientes bajas debido a que el calentamiento no uniforme es bajo y no es suficiente para una distribución de calor plana, para bajas y muy altas densidades de corrientes la mayor probabilidad de falla son las fugas térmicas debido a que los descargadores no son capaces de soportar altos niveles de flujo de energía, como se observan en la siguiente Gráfico No. 43.

Otro de los problemas que presentan los descargadores al momento de su funcionamiento son los defectos de Fabricación y así como también la mala selección del nivel de voltaje y Capacidad absorción térmica.



Gráfico No. 43: Avería por mal funcionamiento de los descargadores

Fuente: Laboratorio de transformadores de la EEASA¹²

3.1.5 Módulo de Desconexión de los Descargadores (Surge Disconnecter)

Es un dispositivo conectado en serie con un descargador que separa el cable de tierra desde la parte inferior del descargador cuando el descargador se ha saturado o a llegado a operar debido a un sobrevoltaje, también se lo conoce como un cable de tierra seccionador (GLD)¹⁵ o aislador, este sólo funciona si la frecuencia de la corriente que circula a través del dispositivo durante un fallo es de bajo orden, no va a funcionar con corrientes de impulso las cuales son de alta frecuencia.

Este dispositivo consta de un elemento de calefacción, de activación, y de derivación constante de estado y un elemento de separación tal como se muestra en el Gráfico No. 44, durante el funcionamiento en estado estable la descarga de corriente de fuga se lleva a cabo alrededor del elemento de calentamiento y el elemento de separación, el elemento de separación es generalmente un pequeño dispositivo explosivo que se activa al detectar una temperatura determinada, durante una descarga eléctrica, el calor generado en el GLD no es suficiente para encender el elemento de separación ya que está diseñado de tal manera que sólo funciona cuando la corriente de falla fluye a través del dispositivo [15].

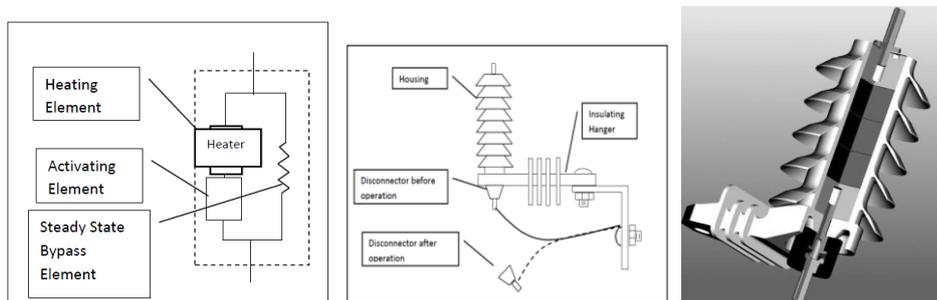


Gráfico No. 44: Esquema de un GDL

Fuente: Jonathan Woodworth, Surge Disconnecter (Arrester Works).

¹⁵ Del Ingles Ground Lead Disconnecter

Los fabricantes de descargadores diseñan a estos dispositivos de desconexión con curvas característica de tiempo - corriente de tal manera que protejan de daños al descargador, estos datos se entregan representados ya sea gráficamente o de forma tabular, como se muestra en el Gráfico No. 45 estos datos deben ser tomados en cuenta al momento de realizar la coordinación con el elemento de protección aguas arriba [15].

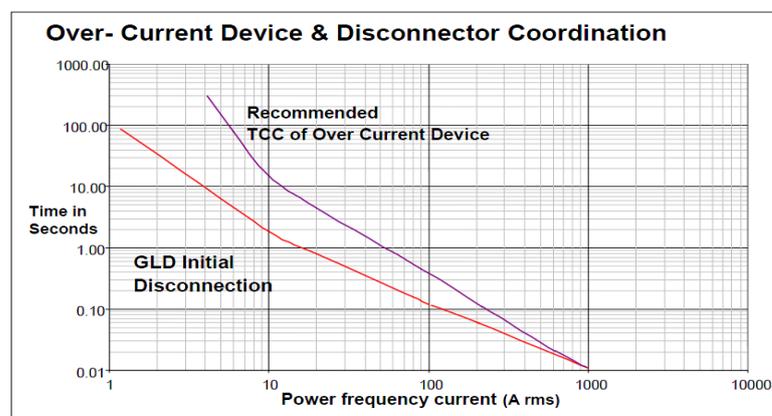


Figure 3 Over-current Device vs. Disconnecter Initiation

Gráfico No. 45: Curva Tiempo – Corriente de un GDL

Fuente: Jonathan Woodworth, Surge Disconnecter (Arrester Works)

3.2 Esquemas de Conexión de los Descargadores.

Los esquemas de conexión de los descargadores es una temática que ha sido analizado ampliamente desde diferentes puntos de vista tales como: las perturbaciones transferidas al lado de bajo voltaje de los transformadores, la formación de lazos inductivos, voltajes residuales, efectos subsecuentes de las protecciones de sobrecorriente asociadas y finalmente en los últimos tiempos se ha empezado a analizar desde el punto de vista de los índices de calidad de servicio técnico[6].

Razón por la cual existen diferentes esquemas de conexión puesto que se consideran según el tipo de descargador, el tipo de accesorios y la

ubicación tanto del descargador como la de sus componentes dentro de la instalación; tales como:

3.2.1 Esquemas en Función de la Conexión al Neutro y Tierra.

Para que el descargador pueda drenar cualquier sobrevoltaje de la red a tierra es necesario que el terminal de la base de este se conecte a la bajante de tierra, por otra parte para el caso de transformadores de distribución tanto su tanque como el neutro multiaterrado de la red pueden o no conectarse ya sea sólidamente o mediante Gaps a la bajante de tierra del descargador como se puede observar en el Gráfico No. 46 [6].

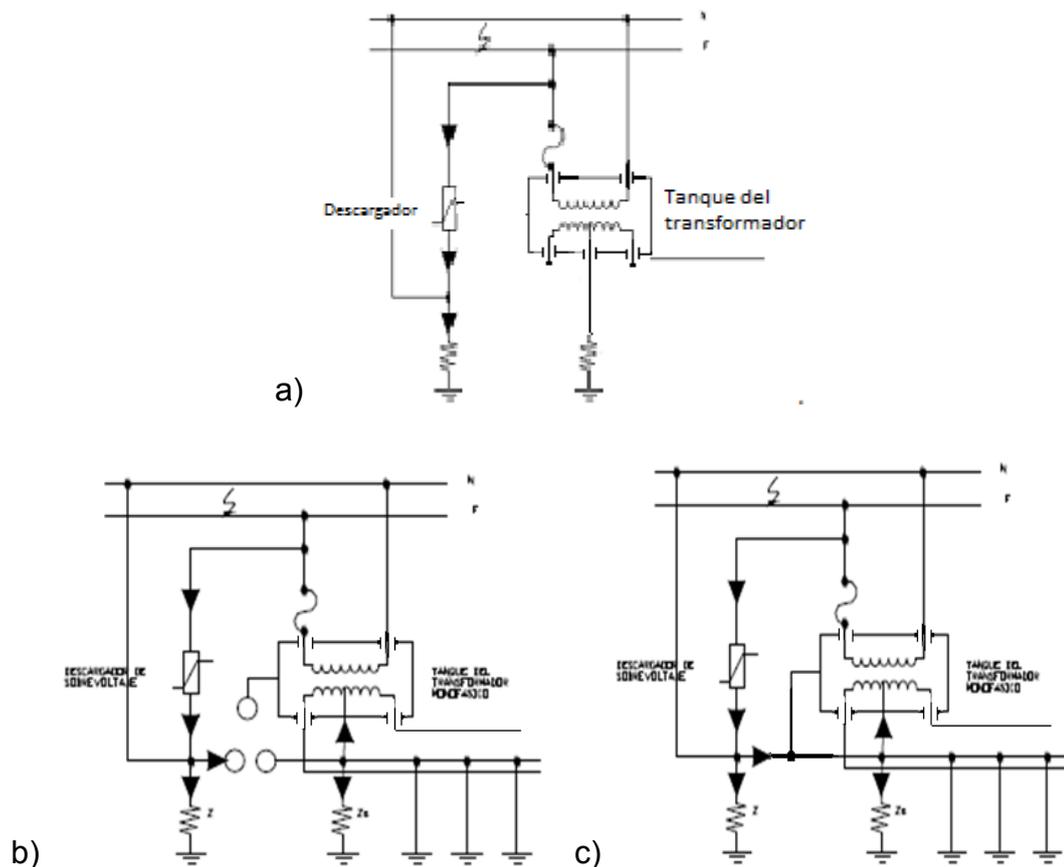


Gráfico No. 46: Esquemas de Conexión de la Bajante de Tierra, Tanque del Transformador y el Neutro: a) Sin Conexión b) Con Gaps y c) Sólida.

Fuente: Copper Power Systems, Electrical System Protection

3.2.2 Esquemas en Función de la Conexión de la Bajante de MV

Uno de los aspectos muy importantes a ser considerados para una operación eficaz del descargador, es decir para lograr una protección efectiva frente a sobrevoltajes impulsivos es la longitud del cable de la bajante de MV hasta el terminal superior del descargador esto por un lado, y por el otro depende también de la longitud del cable para la unión del terminal inferior y la bajante de tierra. Se debe tomar en cuenta puesto que al existir una mayor longitud que recorre la corriente impulsiva del rayo se origina una mayor caída de voltaje por la resistencia del cable y por otra parte que es la más importante, se origina un mayor voltaje inducido en todos los equipos que tengan partes metálicas o cables que estén paralelos al recorrido de la corriente del rayo como se puede observar en el Gráfico No. 47, esto debido a la permisividad magnética del aire que permite que se cree una inductancia que está en el orden 0.94 uH/m está a una determinada distancia entre el descargador y el tanque del transformador [13].

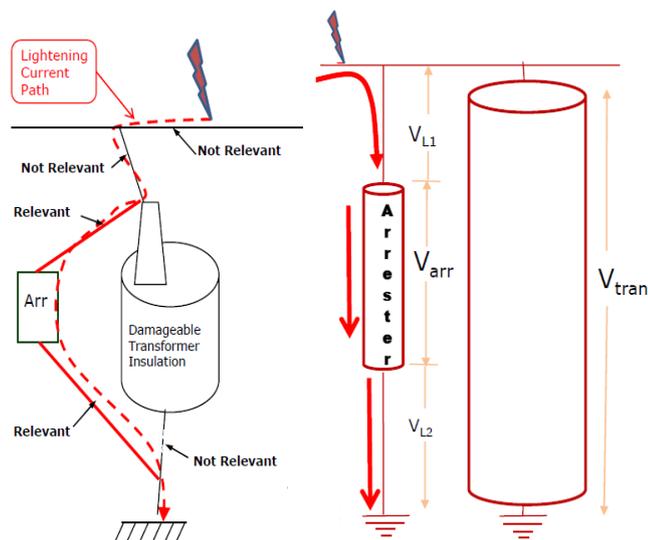


Gráfico No. 47: Recorrido de la corriente del rayo y los voltajes inducidos.

Fuente: Jonathan Woodworth, Arrester Lead Length (Arrester Works)

Ya en la práctica se tienen diferentes formas de conectar la bajante desde la red de MV al descargador y de la base de este a tierra como se puede observar en el Gráfico No. 48. Para evaluar el comportamiento de cada una de ellos frente a un sobrevoltaje impulsivo se lo puede hacer mediante la siguiente ecuación [13]:

$$V_{tran}(t) = V_{L1}(t) + V_{arr}(t) + V_{L2}(t) \quad \text{Ec. 7}$$

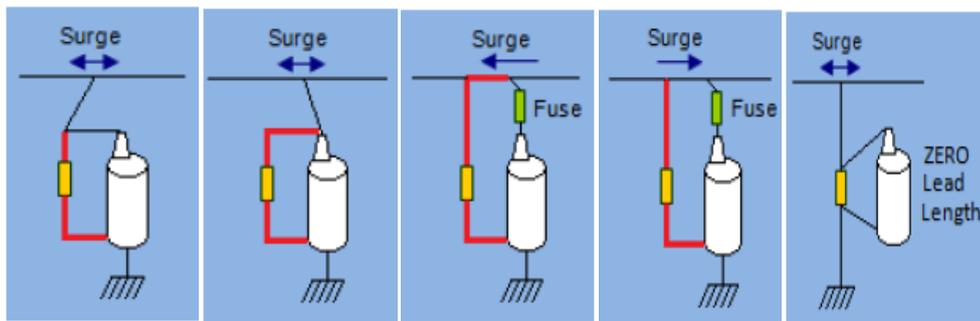


Gráfico No. 48: Esquemas de conexión de la bajante de MV y Tierra

Fuente: Jonathan Woodworth, Arrester Lead Length (Arrester Works)

Este análisis ha sido ampliamente desarrollado por diferentes fabricantes de descargadores y firmas consultoras involucradas en el tema, como es el caso de la Firma Arrester Works, cuyos resultados se muestran en el Gráfico No. 49 en la que se pueden observar la forma de onda del voltaje en el dominio del tiempo en el descargador así como también el voltaje inducido por las bajantes de longitud total de 2,5 pies y la suma de estos dos voltajes frente a una corriente impulsiva de 31 kA en 2 us.

Analizando estas curvas se puede indicar que tanto el signo como el tiempo en que ocurre el pico de voltaje es diferente para el voltaje residual como para el voltaje inducido, por lo que no es una suma simple de estos voltajes [13].

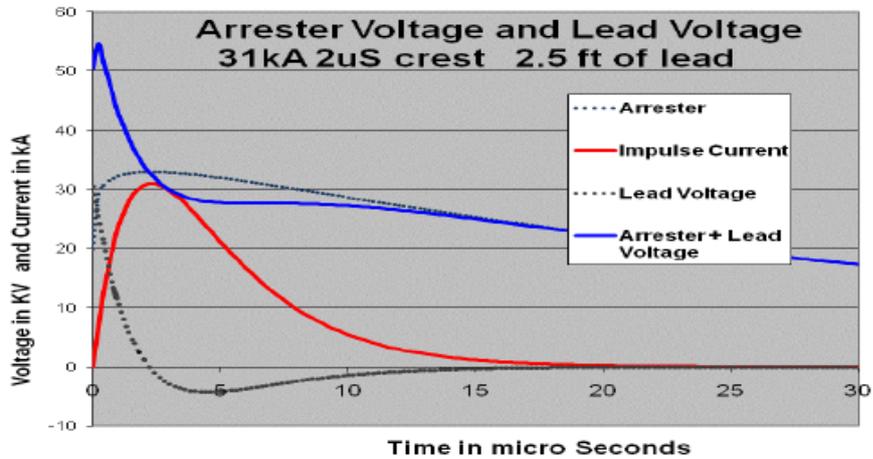
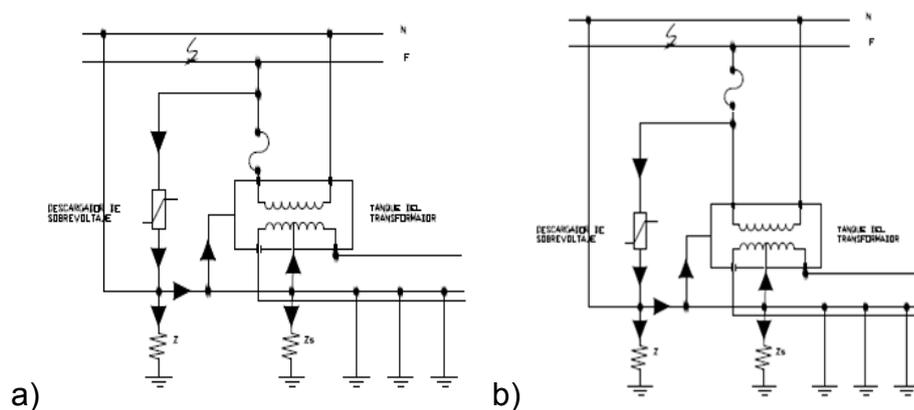


Gráfico No. 49: Formas de Onda de Voltaje que Aparece en el Transformador debido a Lazos Inductivos.

Fuente: Jonathan Woodworth, Arrester Lead Length (Arrester Works)

3.2.3 Esquemas en Función de la Ubicación del Fusible

El descargador puede ser conectado antes (en paralelo) o después (en serie) del fusible que protege al transformador, a lo que generalmente se denomina conexión del descargador al lado de la fuente o al lado de la carga respectivamente, tal como se muestra en el Gráfico No. 50 [6].



**Gráfico No. 50: Conexión del descargador en un transformador 1φ:
(a) antes del fusible, en el lado de la carga**

Fuente: Copper Power Systems, Electrical System Protection

Dónde:

Z = Impedancia del descargador.

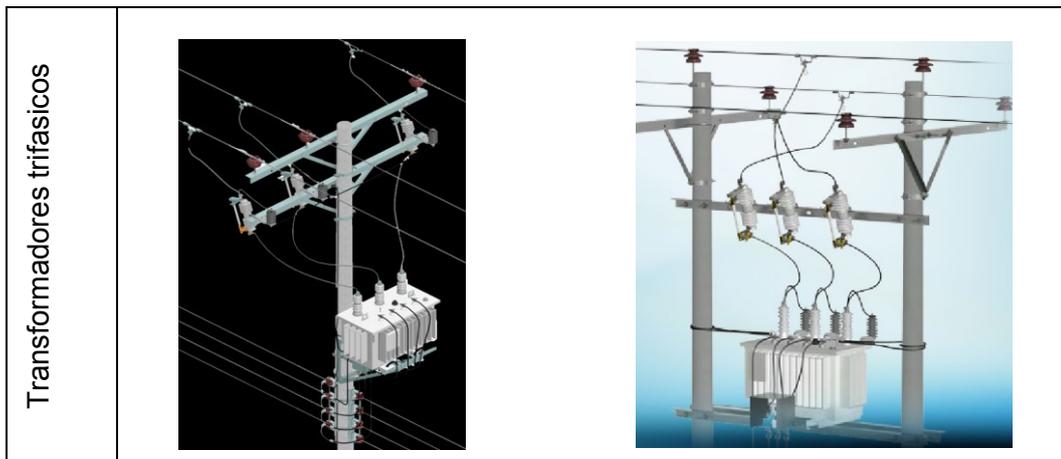
Z_S = Impedancia de puesta a tierra.

En la Tabla No. 6 se observa los tipos de conexión de los descargadores en una red de distribución tanto trifásica como monofásica, y el tipo de puesta a tierra de cada una de estas conexiones.

En esta tabla se clasifica según el tipo de transformador ya sea convencional o autoprotegido, aquí se puede identificar que los descargadores pueden ir en serie con el fusible, como también el descargador se encuentra en paralelo con el fusible, en el caso del transformador autoprotegido el fusible se encuentra en la parte interna del transformador.

Tabla No. 6: Tipos de Conexión de los descargadores

TIPOS DE CONEXIONADOS DE LOS DESCARGADORES			
Trafo	Bajante directo a tierra	Bajante de tierra a través del tanque	Bajante de tierra mallada al tanque y al neutro
Autoprotegido			
Convencional con el fusible al lado de la fuente			
Convencional con el fusible al lado de la carga			



Fuente: MEER¹⁶ y Autoría Propia

3.3 Comportamiento de los Elementos de Protección de Sobrecorriente Frente a Transitorios de Sobrevoltajes Impulsivos

Los elementos de protección de sobrecorriente de las redes de distribución tales como fusibles, seccionadores, reconectores y relés de cabecera entre otros, pueden estar sujetos a corrientes transitorias de tipo impulsivas de valores pico muy elevados que responden a los efectos subsecuentes del rayo, los cuales pueden llegar a acumular la energía mínima necesaria para quemar un fusible que este en serie con un descargador, o llegar a la energía máxima que soporta un descargador y provocar así un cortocircuito franco a tierra hasta que explote o un elemento de protección de sobrecorriente aguas arriba opere, lo cual no es deseable por cortes de energía que representaría, y el aumento no deseado de los índices de calidad de servicio eléctricos.

Estas corrientes transitorias pueden provocar una avería permanente en las redes eléctricas de distribución por la operación de las protecciones de

¹⁶ MEER: Ministerio de Electricidad y Energía Renovable

sobrecorriente, dentro de estos los fusibles son los que con mayor frecuencia son afectados por lo cual su comportamiento ha sido ampliamente analizado por diversos fabricantes de fusibles; como es el caso del Gráfico No. 51 en el que se determina el tiempo que pueden soportar cada uno de los fusibles frente a la magnitud del pico de corriente [16].

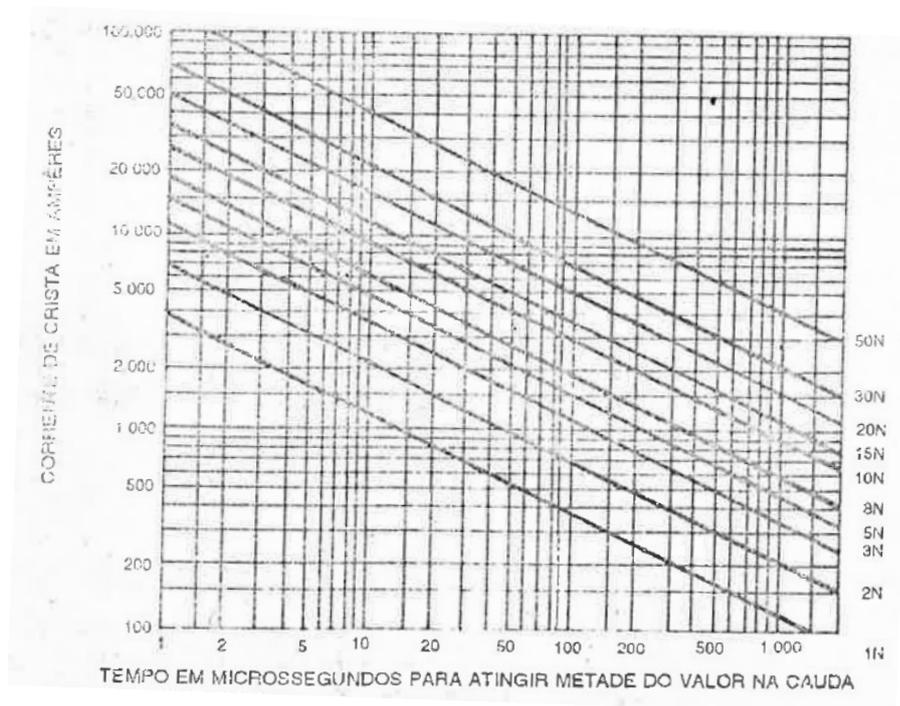


Gráfico No. 51: Relación entre la corriente de impulso y el tiempo de fusión del fusible.

Fuente: José Cipoli, Ingeniería de Distribución

Del gráfico anterior que es para fusibles tipo **N** se puede estimar el comportamiento de los otros tipos de fusibles como el **K** y **T**, para cada una de las diferentes dimensiones como se presentan en la siguiente Tabla No. 7.

En esta tabla podemos obtener las equivalencias de los fusibles de tipo “K” a tipo “N” y los equivalentes de tipo “T” a tipo “N”, y viceversa esto según las Normas IEEE y NEMA [16].

Tabla No. 7: Equivalencia entre los Fusibles K, T y N

IEEE NEMA Tipo "K"	Equivalente de tipo "K" en tipo "N"		IEEE NEMA Tipo "T"	Equivalente de tipo "T" en tipo "N"	
	Para protección de sobrecorriente	Para valores aproximados de corriente de impulso		Para protección de sobrecorriente	Para valores aproximados de corriente de impulso
1K	1N	1N	1HS	1N	-
2K	2N	2N	2HS	2N	5N
3K	3N	3N	3HS	3N	5N
6K	8N	8N	6T	8N	5N
8K	10N	10N	8T	10N	15N
10K	15N	15N	10T	15N	20N
12K	20N	20N	12T	20N	30N
15K	25N	30N	15T	25N	40N
20K	30N	40N	20T	30N	45N
25K	40N	45N	25T	40N	50N
30K	45N	50N	30T	45N	-
40K	50N	-	40T	50N	-

Fuente: José Cipoli, Ingeniería de Distribución

Algunos estudios de marcas reconocidas analizan el comportamiento de los fusibles desde el punto de vista energético, es decir la cantidad de energía que se requiere para que un determinado fusible se funda, esta energía depende de la magnitud del pico de corriente y el tiempo que ésta se presenta, con esto para calcular la energía que estuvo sujeto el fusibles durante el transitorio se calcula con la integral de la corriente en función del tiempo una vez que se haya determinado la forma de onda de esta corriente, tal como se presenta en la Tabla No. 8 para diferentes valores de pico de corriente y para una forma de onda de rayo de 8x20ms la energía viene dado en $A^2 \cdot \text{seg}$ [17].

Tabla No. 8: Integral estandar de energia de la onda de rayo 8x20 ms.

I(Amp.Pico)	$\int idt = 1.33 \times 10^{-5} I^2 (Amp^2 \cdot sec)$
6000	479
8000	851
12000	1915
16000	3404
20000	5320
24000	7661
28000	10427

Fuente: Copper Power Systems, The D-Link Fuse - New Ratings and Explanations of Surge Durability

Los fabricantes de fusibles entregan datos como los que se presentan en la Tabla No. 9 para fusibles de tipo: Dual, X, QA, K, H que corresponde a la energía mínima a la cual se funden los fusibles frente a transitorios de la forma de onda de un rayo, esta energía se puede considerar constante para todo pico de corriente de corta duración; puesto que el proceso que sufre el fusible es un proceso adiabático (temperatura constante), esto debido al rango de tiempo que dura el transitorio, por ello esta energía se puede calcular con la relación I^2t .

Ahora para determinar si un fusible se funde o no, se debe comparar el I^2t de la descarga y el I^2t que puede soportar el fusible, como se presenta en la Tabla No. 9 [17].

Tabla No. 9: Fusibles para sobrecorriente debido a sobrevoltajes.

	Fuse Rating	Min. Melt @ .01 sec	I^2t (@ .01 sec)	KI^2t	% Failure Rate (per Fig. 5*)
Cooper Type K-Links	1	44	19.36	0.01936	5.80%
	2	95	90.25	0.09025	6.60%
	10	410	1681	1.681	2.75%
	15	700	4900	4.9	1.20%
	20	875	7656.25	7.65625	0.70%
	25	1200	14400	14.4	0.55%
	30	1450	21025	21.025	0.45%
	40	1750	30625	30.625	0.30%
Kearney Type QA-Links	10	390	1521	1.521	2.80%
	15	500	2500	2.5	2.10%
	20	700	4900	4.9	1.20%
	25	895	8010.25	8.01025	0.60%
	30	1100	12100	12.1	0.55%
	40	1400	19600	19.6	0.45%
Kearney Type X-Links	1	223	497.29	0.49729	4.25%
	2	223	497.29	0.49729	4.25%
	4	960	9216	9.216	0.60%
	7	1200	14400	14.4	0.55%
	10	1200	14400	14.4	0.55%
	15	1800	32400	32.4	0.30%
Cooper Type D-Links	1	453	2052.09	2.05209	2.30%
	2	600	3600	3.6	1.55%
	4	900	8100	8.1	0.60%
	10	900	8100	8.1	0.60%
	15	900	8100	8.1	0.60%
	20	900	8100	8.1	0.60%

Fuente: Copper Power Systems, The D-Link Fuse - New Ratings and Explanations of Surge Durability

Para comprender con mayor facilidad las diferencias en las características de operación entre cada tipo de fusible frente un transitorio de corriente impulsivo que puede originarse por el contorneo de un aislador o por la operación de un descargador aguas abajo del fusible se muestra a continuación en el Gráfico No. 52.

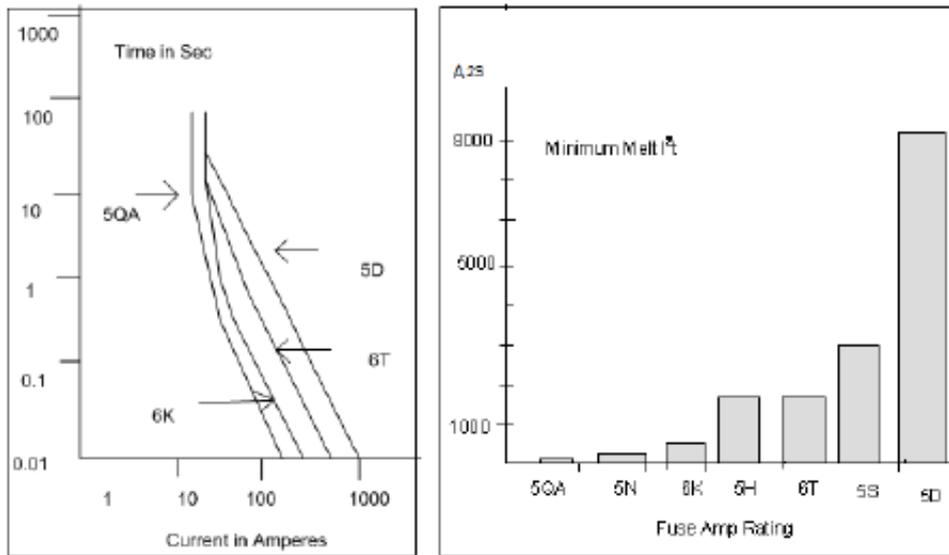


Gráfico No. 52: Curva Característica Tiempo Corriente y Valores de I^2t de Fusibles.

Fuente: Copper Power Systems, The D-Link Fuse - New Ratings and Explanations of Surge Durability

CAPÍTULO VI

MODELAMIENTO DEL ALIMENTADOR PILISHURCO.

Para el análisis del comportamiento de los sistemas eléctricos frente a transitorios de sobrevoltaje tradicionalmente se ha utilizado el programa ATP (Automatic Transcient Program), el cual dispone en su librería de los componentes para los sistemas eléctricos de potencia, pero en este programa no se dispone de elementos para los sistemas de distribución tanto en equipos como en detalles del comportamiento de los elementos de protección de sobrevoltaje, por lo tanto se deben crear los modelos correspondientes con la finalidad de suplir esta deficiencia. Por ello en el presente estudio se utiliza el programa Matlab con su aplicación Simulink, en el cual se puede fácilmente crear cada uno de los componentes de las redes de distribución y de los esquemas de conexión de la protección de sobrevoltaje asociada a detalle y poder así evaluar su comportamiento en diferentes escenarios frente a transitorios de sobrevoltajes.

4.1 Modelamiento De Sobrevoltajes Originados por Rayos

El rayo es un fenómeno físico que ha sido estudiado ampliamente desde hace mucho tiempo por sus efectos catastróficos, tal como los sobrevoltajes que se presentan en las redes eléctricas los cuales se explicaron con mayor detalle en el capítulo 2; por otra parte para 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 Gráfico No. 53 y los parámetros se presentan en la Tabla No. 10 [18].

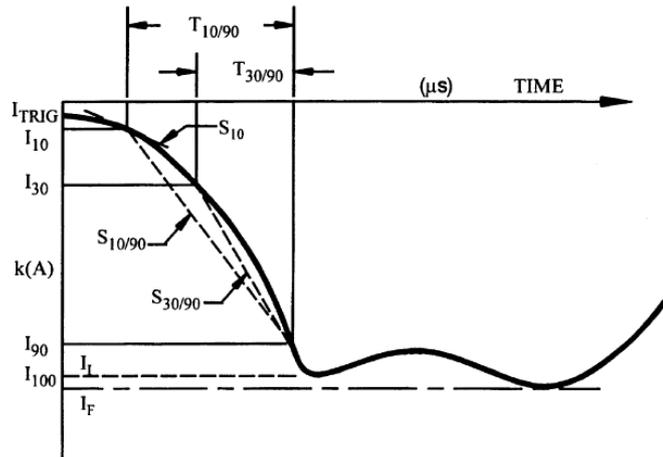


Gráfico No. 53: Forma de onda característica rayo

Fuente: Norma IEEE STD 1410

Tabla No. 10: Parámetros de distribución normal logarítmicas para descargas.

Parámetros de distribución normal logarítmica para descargas negativas				
Parámetro	Primera descarga		Subsiguiente descarga	
	Mediana	β , desviación std logarítmica	Mediana	β , desviación std logarítmica
FRENTE, microsegundos				
$t_d 10/90 = T_{10/90}/0.8$	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
$t_m = I_p/S_m$	1.28	0.611	0.308	0.708
PENDIENTE, kA/microseg				
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	0.645	15.4	0.944
$S_{30/90}$, 30-90%	7.2	0.622	20.1	0.967
CORRIENTE CRESTA, kA				
I_l , inicial	27.7	0.461	11.8	0.53
I_f , final	31.1	0.484	12.3	0.53
Inicial/Final	0.9	0.23	0.9	0.207
Cola, t_n , microsegundos	77.5	0.577	30.2	0.933
CARGA, Q_1 , C	4.65	0.882	0.938	0.882
$\int (I^2 dt)$, (kA) ²	0.057	1.373	0.0055	1.366
Intervalo entre descargas, mseg	35	1.066

Descripción de los parámetros de forma de onda

- I_{10} = Intercepto en el 10% de la corriente de la onda de descarga
- I_{30} = Intercepto en el 30% de la corriente de la onda de descarga
- I_{90} = Intercepto en el 90% de la corriente de la onda de descarga
- $T_{10/90}$ = Tiempo entre los interceptos I_{10} e I_{90} del frente de onda
- $T_{30/90}$ = Tiempo entre los interceptos I_{30} e I_{90} del frente de onda
- S_m = Tan G, máxima rata de aumento de la corriente a lo largo del frente de onda
- S_{10} = Rata instantánea de aumento de corriente en I_{10}
- $S_{10/90}$ = Pendiente promedio (a través de los interceptos I_{10} e I_{90})
- $S_{30/90}$ = Pendiente promedio (a través de los interceptos I_{30} e I_{90})
- Q_1 = Carga de impulso de la corriente de la onda de descarga

Fuente: Norma IEEE STD 1410

Para iniciar el modelamiento del rayo es necesario el cálculo de los siguientes parámetros del Alimentador Pilishurco.

4.1.1 Cálculo de Densidad de Descargas a Tierra (Descargas/km²/año)

Dónde:

Ng = Densidad de descargas a Tierra (Descargas/km²/año)

Td = Nivel Ceraúnico (Tomado del Gráfico No. 28)

$$Td := 10 \text{ Descargas/Km}^2/\text{año}$$

$$Ng := 0.04 \cdot Td^{1.25} \qquad Ng = 0.711 \text{ Descargas/Km}^2/\text{año}$$

4.1.2 Cálculo de la Probabilidad de Caída de Rayos en el Alimentador Pilishurco.

El ancho y la altura de la línea son datos proporcionados por la EEASA.

N1 = Probabilidad de Caída de rayos (Descargas/100Km/año)

b = Ancho de la línea

h = Altura de la línea

$$b := 2.00 \text{ m}$$

$$h := 11 \text{ m}$$

$$N1 := 0.10 \cdot Ng \cdot (b + 28h^{0.6}) \qquad N1 = 8.538 \text{ Descargas/100Km/año}$$

4.1.3 Cálculo del Número de impactos por descargas directas Descargas/100k/Año

Ns = Número de Impactos Directos

Sf = Factor de Apantallamiento (Tomado del Gráfico No. 54).

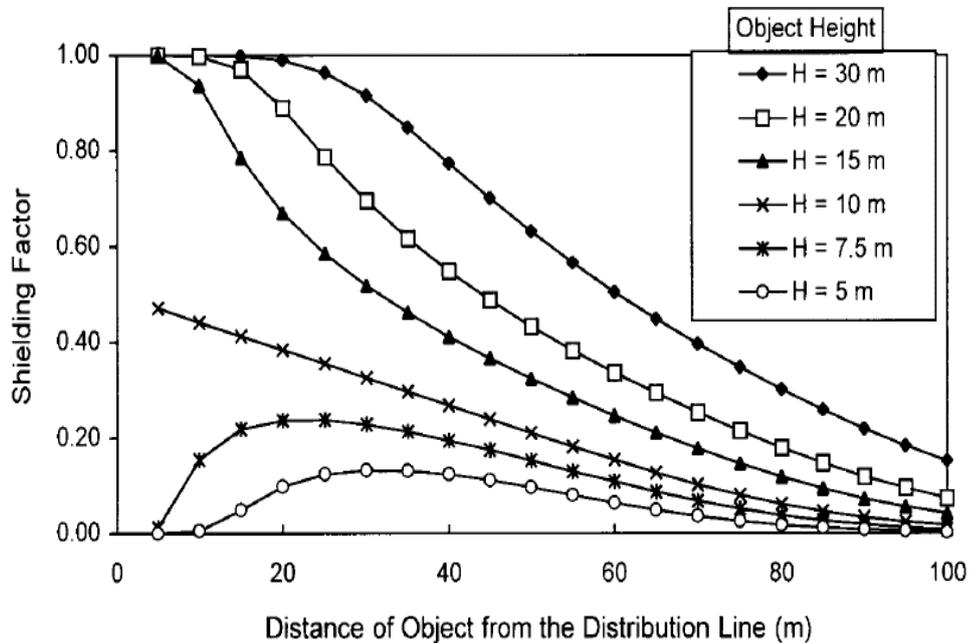


Gráfico No. 54: Factor de apantallamiento de objetos cercanos para una altura de la línea de distribución de 10m

Fuente: Norma IEEE STD 1410

Sabiendo que existe una fila de arboles de 15 m de altura y que se encuentra a 10 m a la izquierda de la línea y que en el lado derecho de la línea no existe objetos cercanos por lo tanto $Sf_{dr}=0$, el cual se obtiene del Gráfico No. 54 y el factor de apantallamiento es de:

$$Sf_{iz} := 0.90$$

$$Sf_{dr} := 0$$

$$Ns := N1 \cdot [1 - (Sf_{iz} + Sf_{dr})]$$

$$Ns = 0.854 \text{ Descargas/100Km/año}$$

4.1.4 Cálculo del Número de impactos por descargas inducidos Descargas/100k/Año

Ns_{ind} = Número de descargas inducidas

CFO = Voltaje Crítico de Contorneo

n_{in} = Número de voltajes inducido (Tomado del Gráfico No. 55).

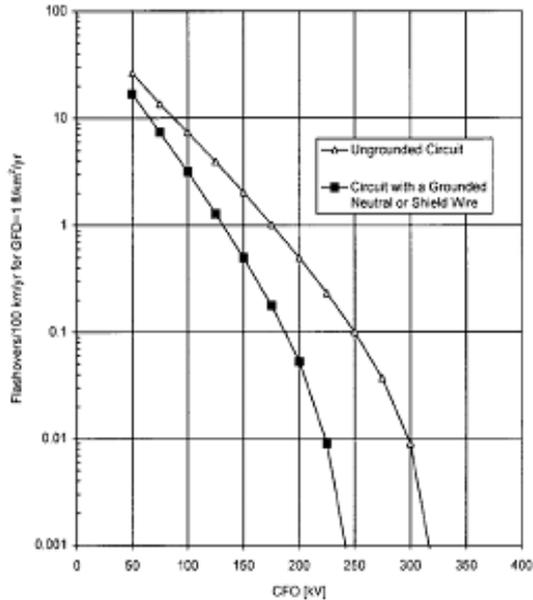


Gráfico No. 55: Número de voltajes inducidos versus el Nivel de Aislamiento de la Línea

Fuente: Norma IEEE STD 1410

Para el cálculo del flameo inducido es necesario obtener el CFO, y se utiliza la curva para circuitos con puesta a tierra.

El CFO total se obtiene de la suma del CFO de componente básico más CFO del segundo componente, y hasta n componentes.

CFOT= CFO Total

CFOC= CFO Cruceta

CFOP= CFO Poste

CFOA= CFO Aislador Pin ANSI 55-5

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 por lo tanto es buen conductor.

CFOC := 0 kV

CFOP := 0 kV

CFOA := 140 kV

$$CFOT := CFOC + CFOP + CFOA$$

$$CFOT = 140 \text{ kV (Tomado de la Norma IEEE 1410 Std.)}$$

$$n_{in} := 0.65$$

$$Ns_{ind} := n_{in} \cdot N_g \quad Ns_{ind} = 0.462 \text{ Descargas/100Km/año}$$

Con estos datos se tiene una probabilidad de la incidencia de rayos sobre el área que abarca la red aérea del alimentador Pilishurco ya sea directo o indirecto, con esto se puede estimar el número de fallas que se presentarían por año debido a descargas atmosféricas en este Alimentador.

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 para pruebas del BIL del equipamiento eléctrico, donde se aplica la forma de onda 1.2/50 μ 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 10kV, 20kV y 30kV que como se observa en el Gráfico No. 56 tienen mayor probabilidad de ocurrencia [6].

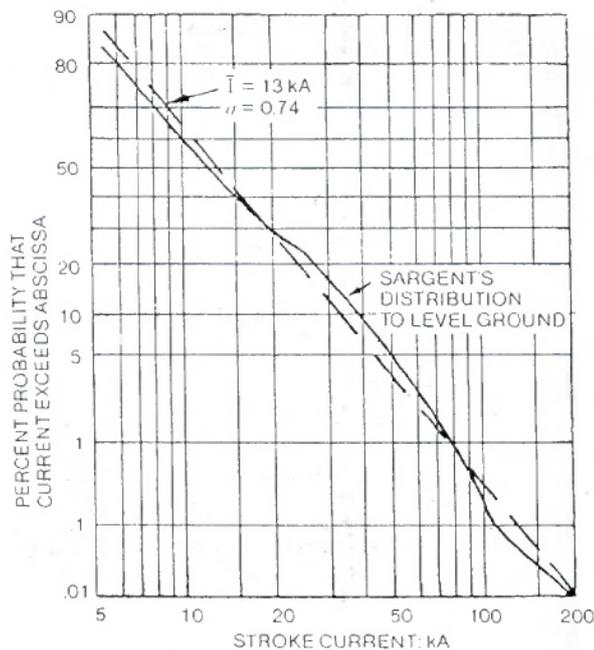


Gráfico No. 56: Probabilidad de exceder determinado valor de Corriente de Rayo.

Fuente: Copper Power Systems, Electrical System Protection.

Una vez que se ha determinado el modelo matemático para el comportamiento de la corriente del rayo, el siguiente paso es determinar el valor del voltaje que aparece en la red eléctrica producto de este rayo, este voltaje puede aparecer por conducción (Descarga Directa) o de forma radiada (Inducido) con una descarga a tierra cercana a la línea, cuyo valor está en función de la distancia más cercana del punto impacto a la línea, como se presenta en la Ec. 8.

$$V_{max} = 38,8 \frac{I_0 h_a}{y} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

I_0 : Pico de corriente del rayo [kA]

h_a : Altura promedio desde el nivel de tierra hacia la línea [m]

y : Distancia entre la línea y el rayo [m]

La ecuación simplificada se obtiene de la Ec. 9 que se observa a continuación.

$$V_{max} = \frac{Z_0 I_0 h}{y} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{v}{v_0} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{v}{v_0} \right)^2}} \right) \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

Z_0 es $1/(4\pi) \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 30\Omega$, Impedancia de la línea para ondas viajera [Ω]

I_0 Pico de corriente de rayo [kA]

h Altura promedio de la línea de distribución con respecto al nivel del piso [m]

y Distancia entre la línea y el rayo [m]

v velocidad del rayo [m/s]

v_0 velocidad de la luz [m/s]

Para el cálculo de la variable y , es necesario analizar la Ec. 10 mediante las ecuaciones Ec. 11 y Ec. 12, para obtener la distancia de la línea de distribución respecto a la descarga ya sea directa o indirecta.

$$y_{min} = \sqrt{r_s^2 - (r_s - h)^2} \quad \text{Ec. 10}$$

$$r_s = 10 * I_0^{0.65} \quad \text{Ec. 11}$$

$$r_g = 0.9 r_s \quad \text{Ec. 12}$$

Donde:

r_s distancia de la descarga y el conductor [m]

r_g distancia de la descarga y la tierra [m]

I_0 Pico de corriente de la descarga (KA)

A continuación se calculará el voltaje pico del rayo mediante las ecuaciones anteriores obtenidas de la norma IEEE 1410 Std.

4.1.5 Cálculo de voltaje inducido por una descarga directa

lo = Corriente Pico del Descarga [kA]

ha = Altura Promedio de la Línea con respecto al nivel de tierra [m]

$ymin$ = Distancia entre la descarga directa y la línea [m]

rs = Distancia de la descarga con respecto al conductor [m]

rg = Distancia de la descarga a tierra [m]

$$lo := 30 \text{ kA}$$

$$ha := 10 \text{ m}$$

$$rs := 10 \cdot lo^{0.65}$$

$$rs = 91.228 \text{ m}$$

$$rg := 0.9 \cdot rs$$

$$rg = 82.105 \text{ m}$$

$$ymin := \sqrt{rs^2 - (rg - ha)^2}$$

$$ymin = 55.887 \text{ m}$$

$$Vmax_dir := 38.8 \cdot lo \cdot \frac{ha}{ymin}$$

$$Vmax_dir = 208.276 \text{ kV}$$

Finalmente con el modelo matemático del sobrevoltaje que puede aparecer en la línea, que en este caso se tomo el sobrevoltaje por impacto directo se desarrolla esquemáticamente mediante bloques el modelo en Simulink tal como se observa en el Gráfico No. 57 en el cual se pueden ingresar 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, el ángulo eléctrico al que

inicia el sobrevoltaje, entre los más importantes; para así poder utilizarlos en los diferentes escenarios.

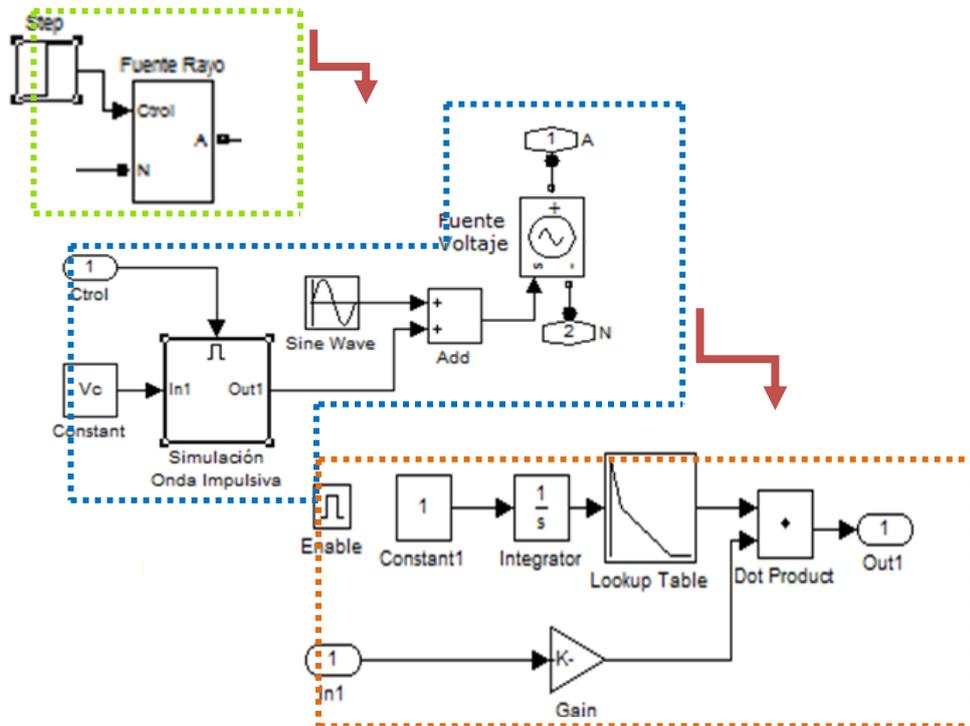


Gráfico No. 57: Modelo del Rayo en Simulink

Fuente: Autoría Propia (Simulink Matlab)

4.2 Modelamiento del Equipo de Protección de Sobrevoltaje.

Este modelamiento es muy importante por cuanto se determina el margen de protección efectivo y el comportamiento de las protecciones de sobrecorriente asociadas, por ello en el capítulo anterior se detalla ampliamente sobre los tipos de equipos y sus esquemas de conexión que forman parte del sistema de protección se sobrevoltaje en las redes de distribución aéreas, específicamente los equipos y esquemas de conexión que forman parte del alimentador Pilishurco; que en su totalidad son descargadores tipo oxido metálico, instalados únicamente en los

transformadores de distribución, esto nos indica que no hay protección de sobrevoltaje instalada explícitamente para el aislamiento de la línea.

El modelo matemático que se emplea para los descargadores es de tipo ZnO, el cual si se dispone en las librerías de Simulink como se muestra en la siguiente Gráfico No. 58.

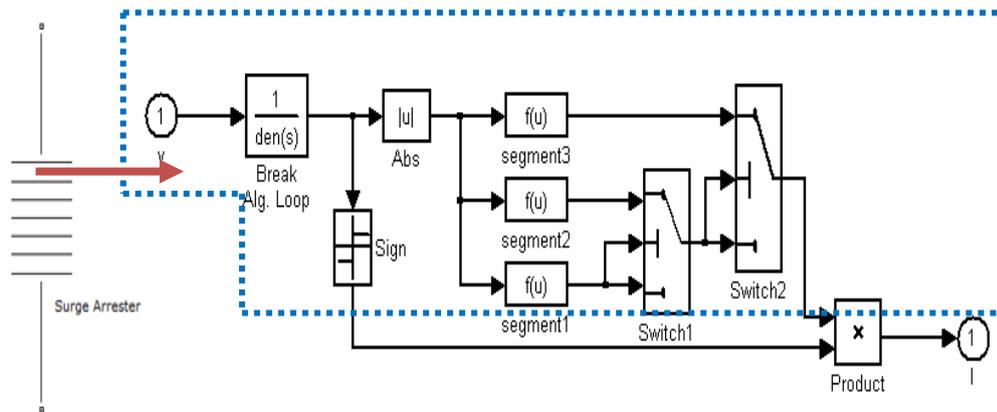


Gráfico No. 58: Modelo de un descargador en Simulink.

Fuente: Autoría Propia (Simulink Matlab)

En este bloque se representa únicamente la característica no lineal V-I del descargador de óxido metálico, la cual se puede modelar bajo la siguiente ecuación matemática,

$$\frac{v}{V_{ref}} = k_i \left(\frac{I}{I_{ref}} \right)^{1/\alpha_i} \quad \text{Ec. 13}$$

Donde:

V_{ref} = Voltaje de Referencia [kV]

I_{ref} = Corriente de Referencia [kA]

k_i = Factor k para segmento i

α_i = Factor α para segmento i

V= Caída de Voltaje en el descargador [kV]

I= Corriente que atraviesa el descargador [kV]

Estos parámetros se obtienen de los fabricantes de descargadores, quienes deben entregar la curva de operación VI ver Gráfico No. 59, y a partir de esta se divide en tres segmentos.

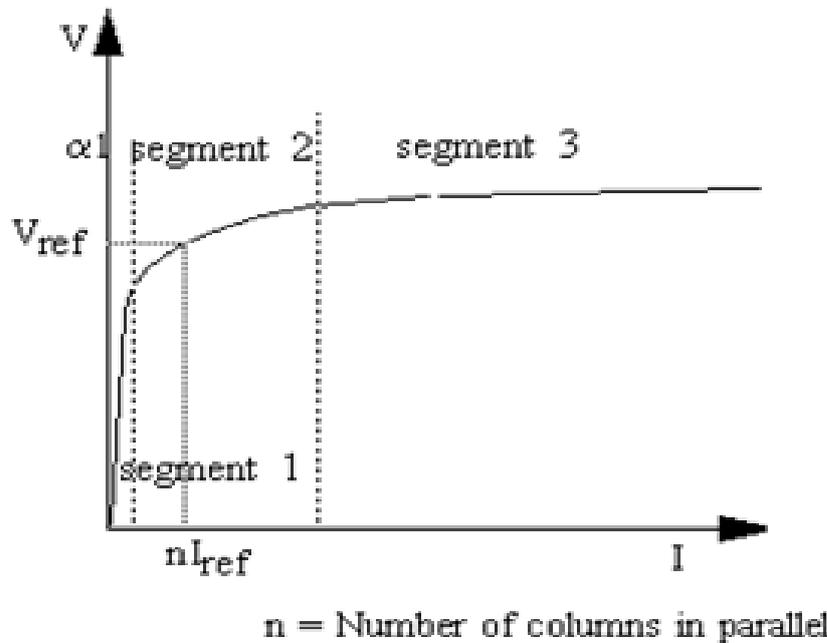


Gráfico No. 59: Curva característica V-I de un descargador de óxido de Zinc

Fuente: Simulink Matlab

De la aplicación de este método gráfico a la curva de un descargador de 10 kV de Óxido de Zinc clase distribución tipo Normal Duty de la marca OHIO/BRASS se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla No. 11

Tabla No. 11: Parámetros para el modelamiento del descargador

I _{ref}	0.0042	Segmento	I _{lim} [A]	α_i	k ₁
V _{ref}	14.285714	Segm 1	0.0004	3.5	3.5
		Segm 2	8	51.6	1.3
		Segm 3	80000	15.81	0.9

Fuente: Autoría Propia

Finalmente para completar el modelo del descargador para que sea más acorde con la realidad se debe tomar en cuenta la capacitancia del aislamiento que lo recubre, así como también de la inductancia propia que se presenta durante el recorrido de la corriente que drena a tierra, tal como se presenta en el Gráfico No. 60, el cual guarda estrecha relación con el modelo descrito en la Norma de la IEEE Working Group 3.4.11. El Modelo del descargador fue obtenido del paper M. Paolone, Modeling of Lightning-induced Voltages on Distribution Network for the Solution of Power Quality Problems, and Relevant Implementation in a Transient Program [19].

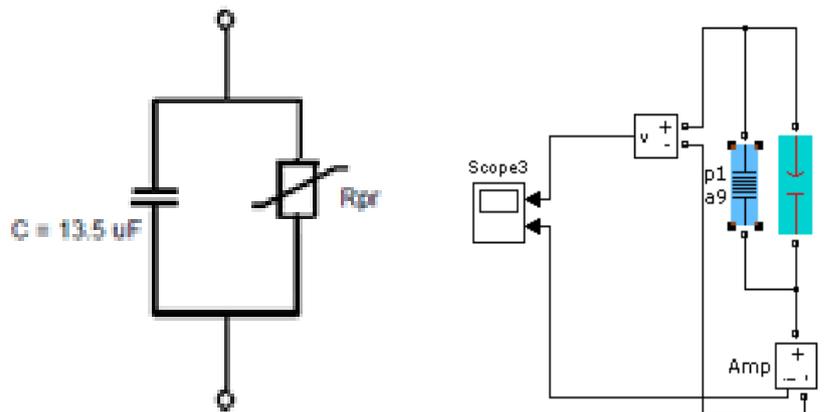


Gráfico No. 60: Modelo de un descargador de Oxido Metálico

Fuente: Simulink Matlab

4.3 Modelamiento de un fusible frente a sobrevoltajes

Para modelar el comportamiento de los fusibles frente a un sobrevoltaje atmosférico, siempre que se generen por esta corriente de igual forma que el sobrevoltaje se les puede considerar como elementos de energía constante para su dilatación y apertura, tal como se detallo ampliamente en el capítulo anterior, por ello se considera una energía de 20 kJ de un fusible Dual 1.4 que se utiliza para un transformador de 25 kVA monofásico; estos datos se ingresan en el modelo de la Gráfico No. 61.

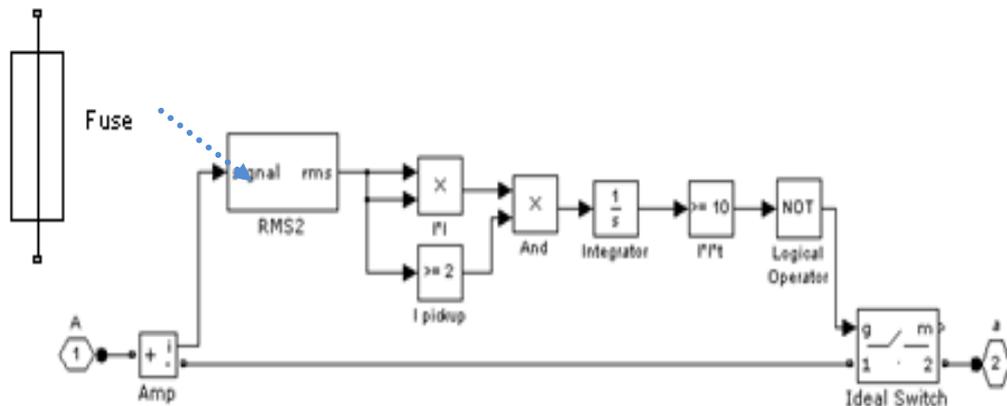


Gráfico No. 61: Modelo del Fusible

Fuente: Autoría Propia

4.4 Modelo de la Puesta a Tierra.

En el sistema de puesta a tierra para el modelamiento se considera la inductancia del conductor de la bajante en serie con la resistencia eléctrica del arreglo electrodos y contrapesos insertados en el suelo como se presenta en el Gráfico No. 62. El modelo se obtuvo del paper M. Paolone, Modeling of Lightning-induced Voltages on Distribution Network for the Solution of Power Quality Problems, and Relevant Implementation in a Transient Program [19]

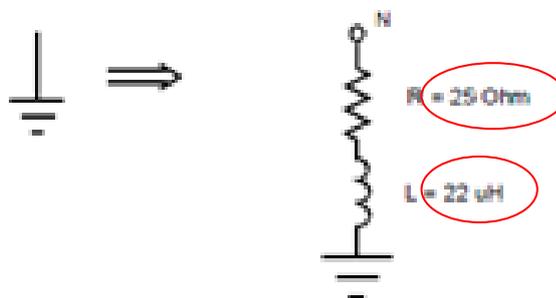


Gráfico No. 62: Modelo de puesta a tierra de la fuente

Fuente: Simulink Matlab

4.5 Modelo de los Transformadores de Distribución.

El objetivo de modelar los transformadores de distribución es para considerar el efecto capacitivo por parte del aislamiento de los bushings de MV e inductivo por parte de la bobina del transformador frente a un sobrevoltaje atmosférico, y con ello poder analizar la incidencia de los esquemas de conexión de los descargadores en estos equipos así como también el comportamiento de fusibles asociados.

En simulink existe el modelo matemático simplificado de un transformador el cual se representa en el Gráfico No. 63.

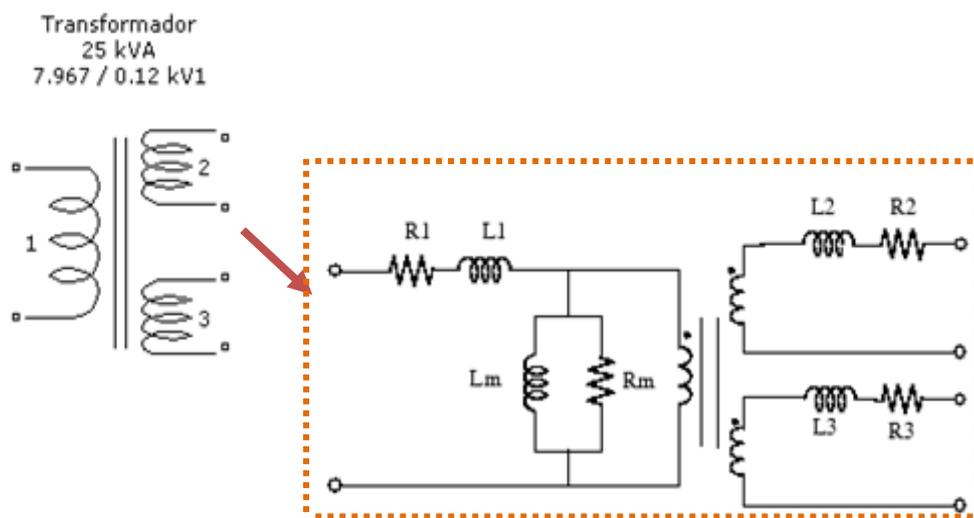


Gráfico No. 63: Modelo en Simulink de un transformado de 2 o 3 devanados.

Fuente: Simulink Matlab

A este esquema para el análisis de sobrevoltajes transitorios de tipo atmosféricos es necesario añadirle la capacitancia tanto de la bobina del lado de alto voltaje como el del lado de bajo voltaje al tanque (Tierra), Tal como se muestra el Gráfico No. 64 [20].

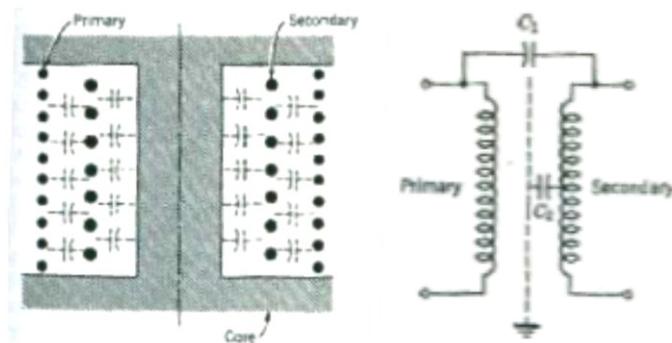


Gráfico No. 64: Modelo de un Transformador Monofásico con la capacitancia al lado de bajo voltaje y alto voltaje.

Fuente: Allian Greenwood, Electrical Transients in Power Systems

Para determinar estos valores se realizó pruebas en el laboratorio de transformadores de la EEASA mediante el equipo MEGGER DELTA 3000 el cual da las mediciones de estas capacitancias como se puede observar en el Gráfico No. 65.



Gráfico No. 65: Medición de la capacitancia del descargador.

Fuente: Autoría Propia¹²

Para el modelamiento de los esquemas se los dividió por casos, como se muestra en la Tabla No. 12, para cada esquema se clasifico según el tipo de transformador es decir, si es un transformador autoprotegido, un transformador convencional con fusible al lado de la fuente o un

transformador convencional con fusible al lado de la carga, todo esto con respecto al tipo de conexión a tierra, es decir puede ser con bajante directo a tierra, bajante de tierra a través del tanque o bajante a tierra mallado al tanque y al neutro.

Estos 9 casos se modelaron en la aplicación Simulink de Matlab los cuales se muestran el ANEXO A-1, donde se encuentra modelado cada uno de los elementos anteriormente nombrados.

Finalmente se presenta en el Gráfico No. 66, el modelo completo de uno de los esquemas donde se observa la fuente del rayo, el descargador, el fusible, el tanque del transformador con las bobinas y capacitancias asociadas; con el propósito de evaluar el comportamiento del fusible y el descargador en función de su ubicación dentro del esquema de conexión.

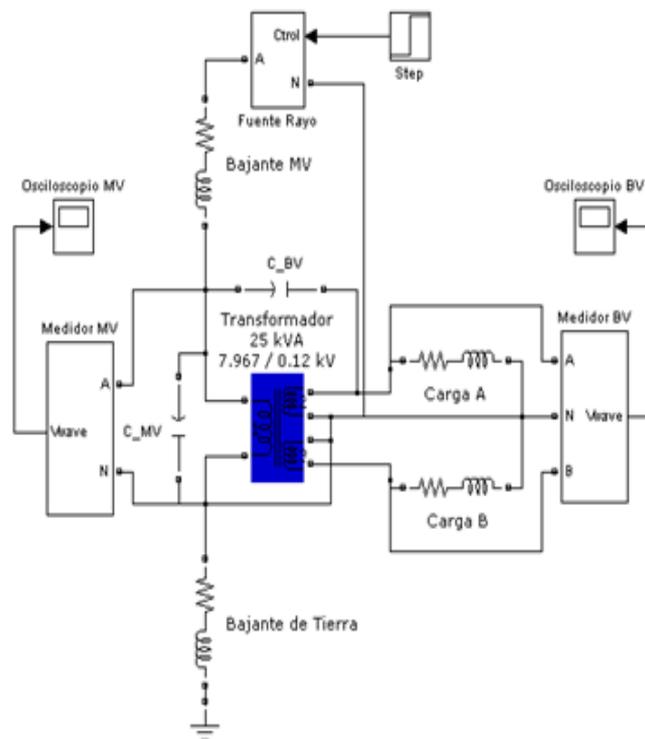
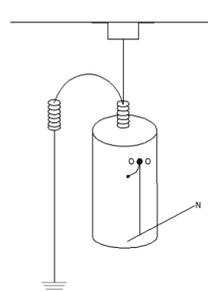
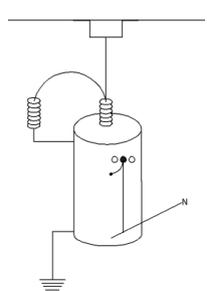
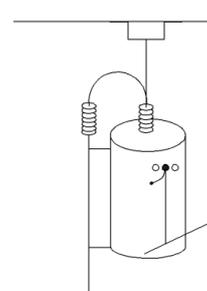
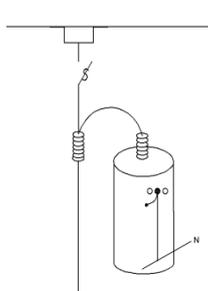
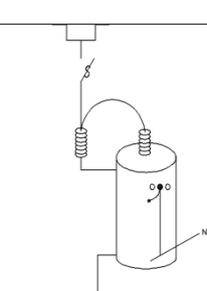
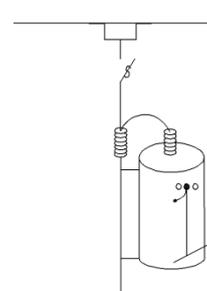
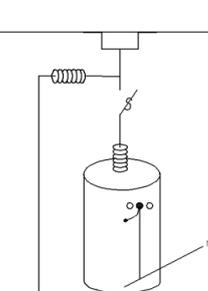
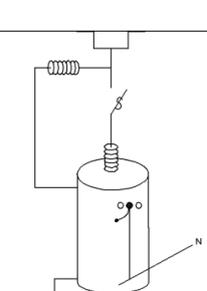
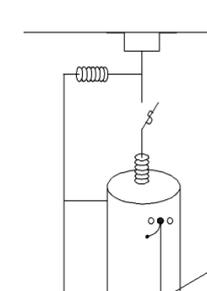


Gráfico No. 66: Modelamiento completo de un transformador monofásico.

Fuente: Autoría Propia (Simulink Matlab)

En la Tabla No. 12, se observa de una manera más real el tipo de conexión y montaje de los casos aplicados para el estudio de los esquemas de conexión de los descargadores para transformadores monofásicos.

Tabla No. 12: Esquemas de Conexión de los Transformadores Monofásicos

ESQUEMAS DE CONEXIÓN DE LAS PROTECCIONES DE SOBREVOLTAJE EN LOS TRANSFORMADORES MONOFÁSICO			
Caso	1. Bajante directo a tierra	2. Bajante de tierra a través del tanque	3. Bajante de tierra mallada al tanque y al neutro
A. Autoprotegido			
B. Convencional con el fusible al lado de			
C. Convencional y autoprotegido con el			

Fuente: Autoría Propia

4.6 Modelamiento de la Línea Aérea de Distribución

Para el análisis del comportamiento de las líneas aéreas de distribución frente a transitorios de alta frecuencia como por ejemplo son los sobrevoltajes originados por rayos que su frecuencia están en el orden de 10 kHz a 3 MHz, se requieren de modelos en los cuales los parámetros eléctricos de la línea sean dependientes de la frecuencia, en la actualidad se disponen de modelos tales como: J'Martin, Bergeron y Nodales principalmente.

Para este estudio se elige el modelo de parámetros distribuidos, que se basa en el método de ondas viajeras de Bergeron disponible en Simulink y ATP Este modelo, esta caracterizado por los valores de la impedancia característica y la velocidad de onda, tal como se muestra en Gráfico No. 67a.

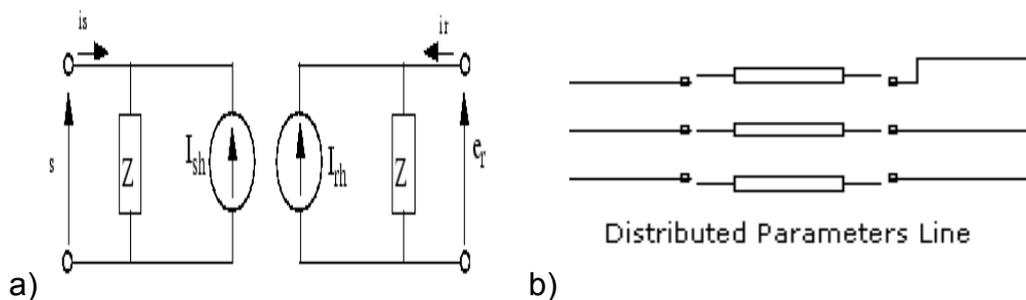


Gráfico No. 67: Modelo del circuito PI de una línea aérea. a) y b)

Fuente: Simulink Matlab

Este bloque en Simulink se llama "Línea de Parámetros Distribuidos" (del inglés Distributed Parametred Line) como se muestra en el Gráfico No. 67b, para esto es necesario ingresar los valores de la frecuencia, resistencia, inductancia y capacitancia de secuencia positiva y cero de la línea, y la longitud del vano.

Los datos de las longitudes de los vanos, resistencias positiva y cero se obtuvo del programa CYME perteneciente a la EEASA, esta tabla se puede observar en el ANEXO B-1.

4.7 Modelamiento Eléctrico de la Estructura de Soporte

Para el análisis de sobrevoltajes de impulso a las estructuras de soporte de las líneas aéreas de distribución se considera en conjunto al poste, cruceta y aisladores de suspensión y/o soporte "pines", tal como se observa en el Gráfico No. 68.

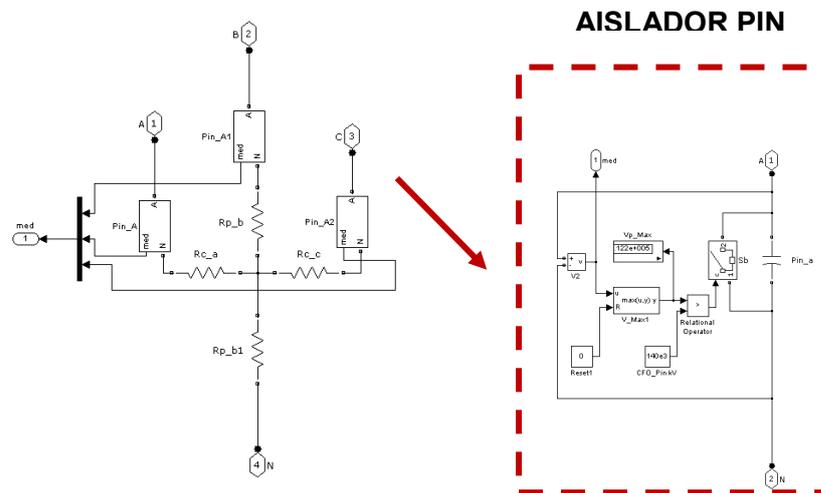


Gráfico No. 68: Modelo del Poste, Cruceta y Aisladores

Fuente: Autoría Propia (Simulink Matlab)

El poste hormigón se considera como un elemento estático, con una impedancia al impulso eléctrico que se obtiene de la Ec. 14. [21]

$$Z_t = 30 * \ln \left[\frac{2(h^2 + r^2)}{r^2} \right] = 283.72 \Omega \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

Z_t= Impedancia del poste (Ω)

h = Altura del poste (m)

r = Radio del poste (m)

El cálculo para los postes utilizados en el Alimentador Pilishurco se considera una altura de 12m y un radio de 15cm, con lo que se obtiene una impedancia del poste de 283.72 [Ω].

La resistencia de la cruceta se calcula con la resistividad del aluminio de 0.028 [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$], una longitud de 2.4 m y 7*3 mm^2 de la sección transversal, dando como resultado 0.0032 [Ω].

Para los aisladores tanto de suspensión como pines se considera como un capacitor en paralelo con un switch controlado por voltaje para simular la ruptura del aislamiento al presentarse voltajes superiores al voltaje de flameo de impulso crítico VFIC, que para el presente estudio se considera un valor de 140 kV para un aislador Pin ANSI 55-5 tomado de la Norma IEEE 1410 Std. [18].

4.8 Modelo Completo de un Tramo del Alimentador Pilishurco

Se modeló un tramo del alimentador con el propósito de evaluar la dispersión de la onda de sobrevoltaje a lo largo de este, y determinar cuántos elementos de sobrecorriente se verían afectados por la actuación de los descargadores asociados, y así también el efecto que tiene hacia los aisladores, para ello se realiza un diagrama esquemático de cada uno de los tramos más representativos y con los equipos involucrados en este alimentador, y se modelo el tramo de mayor probabilidad de rayo como se presenta en el Gráfico No. 69.

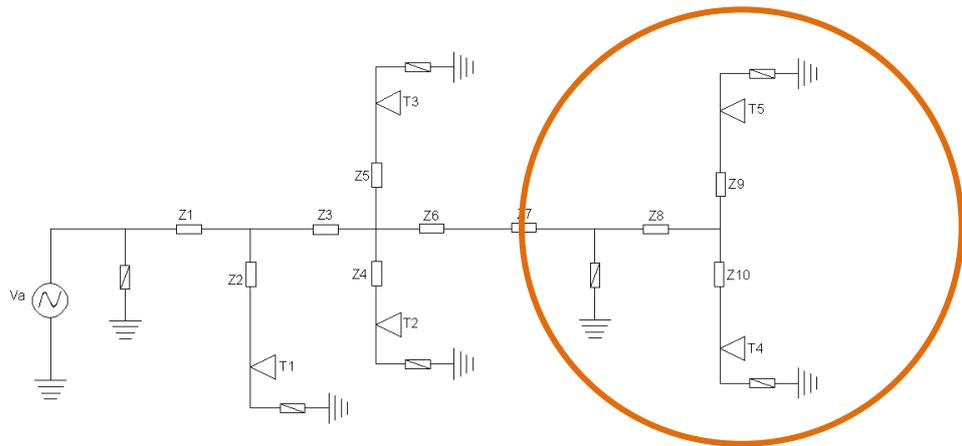


Gráfico No. 69: Diagrama Esquemático de los Tramos más Representativos del Alimentador Pilishurco.

Fuente: Autoría Propia

Este esquema se lo representa en Simulink con cada uno de los modelos anteriormente detallados, con sus parámetros respectivos y se evalúa en diferentes escenarios del punto de caída del rayo, es decir con descargadores y sin descargadores, con el esquema de conexión del descargador de los transformadores ya seleccionado, los resultados se analizan en el siguiente capítulo.

Adicionalmente el objetivo de la simulación del tramo trifásico y monofásico más representativos del alimentador es saber cada cuantos vanos se puede colocar los descargadores a lo largo de la línea en la zona de mayor altura y probabilidad de rayos, en el Gráfico No. 70 se observa el modelo del tramo trifásico.

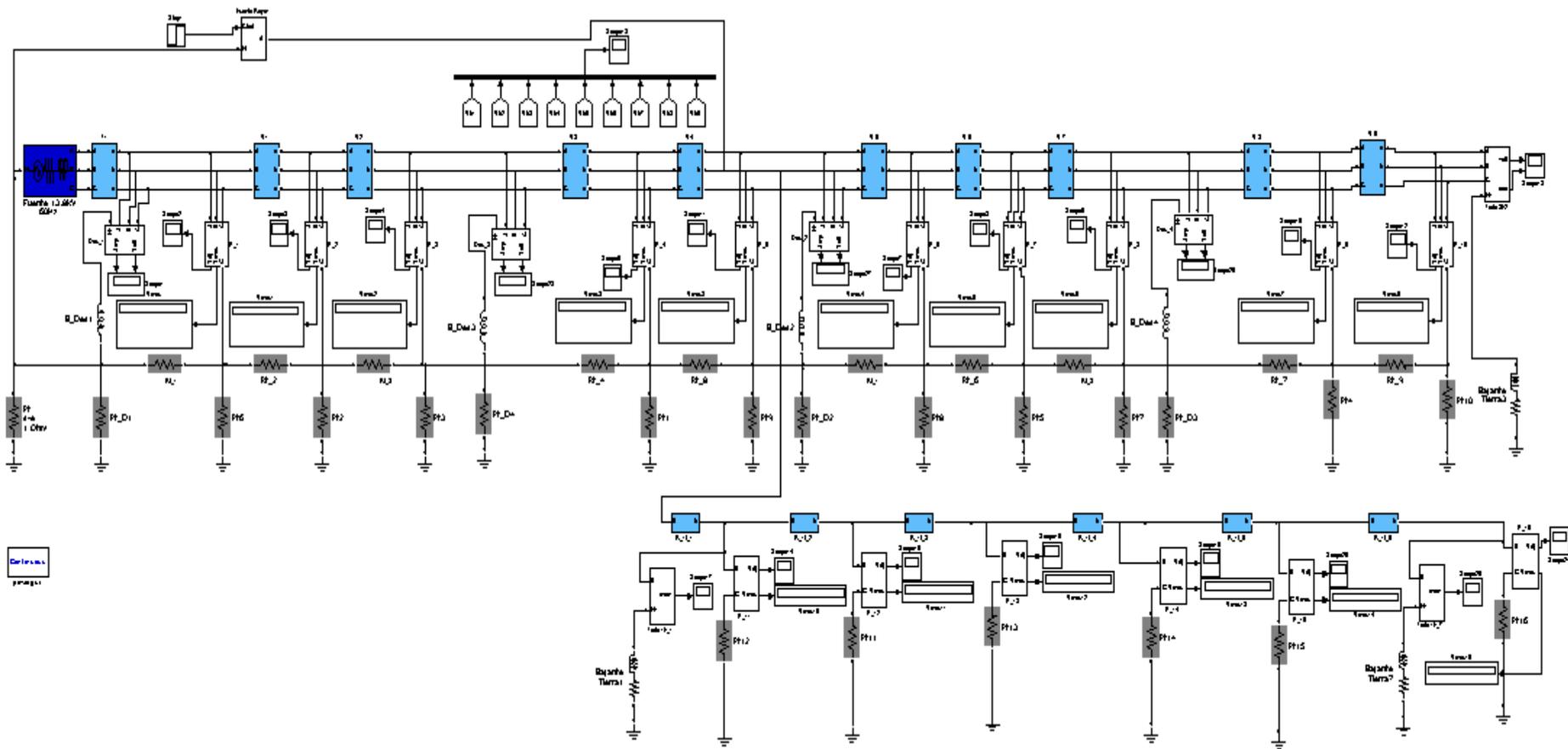


Gráfico No. 70. Modelo en Simulink del Tramo más significativo del Alimentador Pilishurco.

Fuente: Autoría Propia

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

El análisis de los resultados de las simulaciones se divide en 2 grupos de estudio, uno para elegir el mejor esquema de conexión de las protecciones de sobrevoltaje y otro para observar los efectos del esquema elegido y con los elementos de sobrecorriente asociados en el tramo más significativo del Alimentador Pilishurco.

Antes de realizar el análisis es importante indicar en la Tabla No. 13 el valor del pico de voltaje que inciden sobre la línea debido a descargas atmosféricas, obtenidas en los cálculos del capítulo 4 las cuales dependen de las características de las corrientes provocadas durante el rayo, estas han sido establecidas en normas y estándares del CIGRE.

Tabla No. 13: Voltaje Aplicado según el Pico de Corriente del Rayo.

Voltajes Aplicado según el Pico de Corriente del Rayo	
Corriente Pico del Rayo(kA)	Voltaje del Rayo (kV)
10	117.89
20	169.53
30	208.27

Fuente: Autoría Propia

En la Tabla No. 14 se observa cada uno de los casos y escenarios usados en las simulaciones implementadas en la aplicación Simulink del Software Matlab.

Tabla No. 14: Tabla de Propuesta a Analizar para los Esquemas de Conexión de los Elementos de Protección de Sobrevoltaje

Escenario de Simulación de los Esquemas de Conexión de las Protecciones de Sobrevoltaje				
Caso	Transformador	Fusible	Conexión de la Bajante de Tierra	Escenario
A1	Monofásico Autoprotegido 25kVA	Interno al lado de la carga	Directo a tierra	Parámetros: • Impacto directo • Corriente Pico 30kA • Pico de Voltaje de 208.27kV • Onda 1.2/50 us • Resistencia de Tierra 25Ω
A2			A través del tanque	
A3			Mallada al tanque y al neutro	
B1	Monofásico Convencional 25kVA	Lado Fuente	Directo a tierra	
B2			A través del tanque	
B3			Mallada al tanque y al neutro	
C1	Monofásico Convencional 25kVA	En paralelo al descargador	Directo a tierra	
C2			A través del tanque	
C3			Mallada al tanque y al neutro	
D	Trifásico Convencional 30 kVA	Lado Fuente	Mallada al tanque y al neutro	
E	Trifásico Convencional 30 kVA	En paralelo al descargador	Mallada al tanque y al neutro	

Fuente: Autoría Propia

Tabla No. 15: Tabla de Propuesta a Analizar del Tramo más significativo del Alimentador Pilishurco con el Esquemas Elegido

Escenario de Simulación del tramo más significativo del Alimentador Pilishurco con los esquemas elegidos						
Caso	Transformador	Fusible	Conexión	Valor Pico		Escenario
				Corriente	Voltaje	
B3-D_1	Monofásico Convencional 25 kVA, Transformador Trifásico 30 kVA	Lado Fuente	Bajante de Tierra Mallada al tanque y al neutro	10 kA	117.89 kV	Parámetros: • Impacto Directo en la fase B • Impacto en el Vano #5 • Resistencia de puestas a tierra de 25 Ω • Descargadores cada 290m
B3-D_2				20 kA	169.53 kV	
B3-D_3				30 kA	208.27 kV	

Fuente: Autoría Propia

Para elegir el mejor esquema de conexión de los descritos en la Tabla No. 14, se analizarán los valores de voltajes y corrientes obtenidos de cada caso, así como también si provocan o no la apertura del fusible asociado, es decir si opera el fusible del transformador o el fusible aguas arriba en la línea y con los resultados de este análisis mejorar los índices de Calidad del Alimentador y así garantizar la protección de los equipos.

Se plantea en total 11 esquemas de conexión, 9 para transformadores monofásicos tanto para autoprotegidos (A1, A3, A3, C1, C2 y C3) como para convenciones (B1, B2 y B3), y 2 esquemas para transformadores trifásicos convencionales (D y E). Cada uno de ellos se analizaran en las condiciones más críticas, esto es con un voltaje pico de 208.27 kV originado del impacto directo de un rayo de corriente pico de 30 kA, por cuanto este valor es el más alto entre las corrientes de mayor probabilidad de ocurrencia por lo que es considerada la más significativa. Para valores de corriente pico superiores a 30 kA la probabilidad es muy baja como de observa en el Gráfico No. 56.

La potencia de los transformadores se toma en cuenta como un factor importante para la simulación por cuanto en función de esta se tiene la dimensión del fusible asociado, y de la energía que puedan soportar estos dependerá que opere durante el transitorio objeto del presente estudio, por tal razón se considera de 25kVA para transformadores monofásicos y de 30kVA para trifásicos, esto por ser los que en mayor número se encuentran instalados en el alimentador Pilishurco.

El valor de la resistencia de puesta a tierra de los 11 esquemas se consideró de 25 Ω para las simulaciones, debido a que este es el valor máximo permitido para las instalaciones de puesta a tierra en la EEASA la cual se considera extrema, por cuanto las condiciones de humedad y tipo de suelo en el cerro Pilishurco implican una muy baja resistividad de suelo

y con ello el valor de la resistencia de puesta a tierra resultante es menor a 25Ω .

Para analizar el comportamiento de los esquemas seleccionados sujetos a un impacto de un rayo en la red y la incidencia que se presenta con la instalación o no de descargadores de Oxido Metálico a lo largo del Alimentador, se modeló la zona donde existe la mayor probabilidad de ocurrencia de descargas atmosféricas que se encuentra en la cima del cerro Pilishurco, por tal razón se modeló la parte final del Alimentador la cual consta de un tramo monofásico y un tramo trifásico.

El modelo completo está constituido de 2 partes, la primera consta de un bloque de línea que representa el troncal desde la subestación Atocha hasta las faldas del cerro Pilishurco considerando los parámetros de la impedancia de la línea y sin considerar el comportamiento de las estructuras de soporte; la segunda parte se considera el tramo comprendido desde las faldas hasta la cima del cerro Pilishurco donde se encuentran las antenas de telecomunicaciones, en este bloque se modela todas las estructuras de soporte y sus derivaciones tanto los tramos monofásicos como trifásicos. Se simplifica el modelo de esta manera por cuanto del análisis de simulaciones iniciales donde se determinó que el rayo no afecta a más de 4 postes aledaños al impacto y por otra razón importante es que el tiempo de ejecución de la aplicación simulink implica una restricción para el número de elemento que integran el modelo.

El modelo del segundo tramo consta 9 vanos (línea trifásica de parámetros distribuidos), 10 estructuras de soporte (cruceta, aisladores y poste) y el esquema de conexión de las protecciones de sobrevoltaje (transformador $3\emptyset$, descargadores, fusibles y puesta a tierra) al final tramo. El tramo monofásico según su topología se deriva del poste #4 del tramo trifásico. En este tramo monofásico se modeló 6 vanos (línea monofásica de parámetros distribuidos), 6 estructuras de soporte (cruceta,

aislador y poste) y 2 esquemas de conexión monofásicos de protección de sobrevoltaje, uno en el poste que inicia el tramo monofásico y el otro en el poste que finaliza el mismo, como se observa en el Gráfico No. 70. Para el análisis de los elementos de sobrevoltaje se simula el tramo trifásico sin y con descargadores cada 290 m aproximadamente para cada escenario y analizar su efecto en la línea.

Para el análisis del modelo completo se considera el esquema monofásico y trifásico ya elegido, el impacto directo de un rayo en la fase B del Poste #4 (tramo trifásico) con 3 escenarios en función del pico de corriente estos son: 10kA, 20kA y 30kA presentados en la Tabla No. 15 estos valores de corriente de rayo son los de mayor probabilidad de ocurrencia por lo que con estos valores se analizan los efectos del rayo en los elementos de protección de sobrevoltaje y en los elementos de sobrecorriente asociados. El impacto del rayo se aplica en la fase B puesto que esta se ubica en la corona de la estructura de soporte, la que constituye el punto más alto y al estar en el centro de la estructura se observa de mejor manera el efecto inductivo que produce en la fase A y C de la línea, además se puede analizar los efectos en el ramal monofásico por cuanto esta se deriva de la fase B.

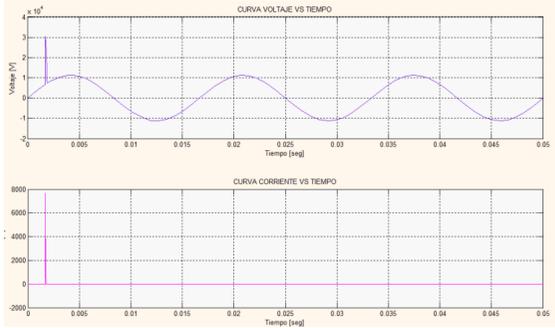
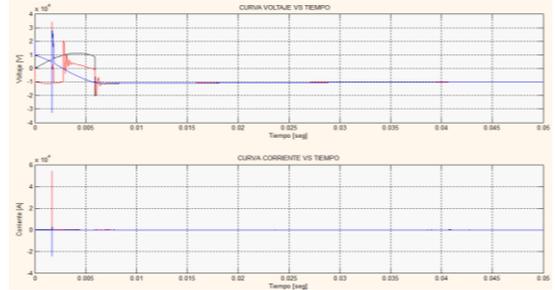
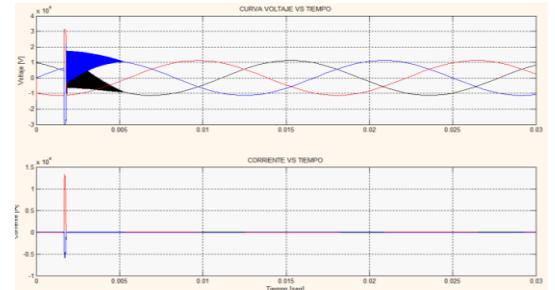
5.1 Discusión de los Resultados del Modelamiento de los Esquemas de Conexión de los elementos de Protección de Sobrevoltaje

Los resultados de las simulaciones de los 9 esquemas de conexión de transformadores monofásicos y los 2 esquemas para transformadores trifásicos que se presentan en la Tabla No. 16, se comparó los valores de pico de voltaje en el lado de Medio Voltaje y en el lado de Bajo Voltaje como también los valores de corriente que atraviesan el descargador y con ello la operación o no del fusible, con lo que se obtuvo que el Caso

C3 presenta los valores de pico de voltaje más bajos tanto en el lado de MV como en el lado de BV con respecto a los casos A y B, por otro lado la corriente que drena el descargador es aproximadamente igual en los tres casos (A3, B3 y C3), lo cual no ocurre con la corriente que atraviesa el fusible del transformador siendo mucho mayor en los casos B provocando incluso la apertura del fusible.

Tabla No. 16: Tabla de Resultados de Modelación de Esquemas de Conexión de los Elementos de Protección de Sobrevoltaje

RESULTADOS DE MODELAMIENTO DE LOS ESQUEMAS DE CONEXIÓN DE LOS EQUIPOS DE PROTECCIÓN DE SOBREVOLTAJE DE LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN										
Vp. _{RAYO} = Valor Pico del Rayo Vn _{LM} = Voltaje Nominal en el lado de Media V _{LB} = Voltaje en el lado de Bajo			Ip. _{DESC} = Corriente Pico en el Descargador Vp. _{DESC} = Voltaje Pico en el Descargador Vp. _{LM} = Voltaje Pico en el lado de Media			Rp=Resistencia de Puesta a Tierra Vp. _{LB} = Voltaje Pico en el Lado de Baja Ip. _{RAYO} =Corriente pico del rayo				
Curva 1.2/50 μs; Vp. _{RAYO} = 208.27kV; Ip. _{RAYO} =30kA; Rp=25[Ω]; Potencia de los transformadores monofásicos=25kVA; Potencia de los transformadores Trifásicos=30kVA										
Esquemas	Descripción	Vn _{LM} . Trafo [kV]	V _{LB} . Trafo [V]	Operación de Fusible	Ip. _{DESC} [kA]	Vp. _{DESC} [kV]	Vp. _{LM} [kV]	Vp. _{LB} [V]	Curva	
MONOFASICOS	A1	Transformador Autoprotegido con Bajante directo a tierra	7.97	120	No opera	7.26	31.41	390.30	3281	
	A2	Transformador Autoprotegido con Bajante de tierra a través del tanque	7.97	120	No opera	7.69	30.32	31.07	466.8	
	A3	Transformador Autoprotegido con Bajante de tierra mallada al tanque y al neutro	7.97	120	No opera	7.68	30.33	30.74	462.3	
	B1	Transformador Convencional con el fusible al lado de la fuente con Bajante directo a tierra	7.97	120	Si opera	7.35	30.23	388.00	5841	
	B2	Transformador Convencional con el fusible al lado de la fuente con Bajante de tierra a través del tanque	7.97	120	Si opera	7.67	30.31	30.51	459.98	
	B3	Transformador Convencional con el fusible al lado de la fuente con Bajante de tierra mallada al tanque y al neutro	7.97	120	Si opera	7.67	30.31	30.41	457.7	

MONOFÁSICOS	C1	Transformador Convencional con el fusible el fusible en paralelo al descargador con Bajante directo a tierra	7.97	120	No opera	7.37	30.20	389.91	5874	
	C2	Transformador Convencional con el fusible en paralelo al descargador con Bajante de tierra a través del tanque	7.97	120	No opera	7.68	30.31	30.32	4568	
	C3	Transformador Convencional con el fusible en paralelo con el descargador con Bajante de tierra mallada al tanque y al neutro	7.97	120	No opera	7.68	30.31	30.31	456.6	
TRIFÁSICO	D	Transformador con conexión del fusible al lado de fuente	13.8 / 7.97	220 / 127	Si opera	54.10	34.25	34.25	-	
	E	Transformador con conexión del fusible en paralelo con el descargador	13.8 / 7.97	220 / 127	No opera	13.33	31.38	31.38	-	

Fuente: Autoría Propia

El objetivo del análisis se centra en mejorar los índices de calidad, FMIK y TTIK con lo cual se elige el Caso B3 que tiene el fusible al lado de la fuente y el descargador en serie montado en el tanque del transformador, esto implica que al momento que opera el descargador el fusible opera debido a una alta corriente con lo cual se funde y deja sin servicio solo a la zona que alimenta el transformador, esto disminuye la cantidad de kVA'S fuera de servicio y por lo tanto disminuye el FMIK del Alimentador, con esto se disminuye también el TTIK ya que al tener una solo zona fuera de servicio es mucho más rápido la ubicación de la falla y por lo tanto el tiempo que se demora en corregir la misma. Esto en comparación del Caso C3, que al estar el fusible en paralelo con el descargador no se funde como se observa en la Tabla No. 16, provocando que las protecciones de sobrecorriente que se encuentra aguas arriba, que en este caso es el Reconectador, sense estas altas corrientes lo que ocasionaría la primera apertura y el recierre luego de 5 seg y si la avería del aislador o descargador es definitiva causará la apertura permanente del Reconectador. Si el impacto ocurre aguas arriba del Reconectador con el esquema C3 el Alimentador Pilishurco permanecería abierto hasta la detección de la falla y al no tener especificaciones claras de la ubicación de la falla, la corrección de la misma demoraría horas y además que todos los kVA'S se encuentran fuera de servicio; los mismos efectos se tienen en el Caso D que presentan el fusible ubicado en el lado de la fuente, a esto se suma las fallas internas del descargador que son de tipo permanente y provocan la apertura del fusible de la línea.

5.2 Discusión de los Resultados del Modelamiento del Alimentador Pilishurco Frente a Sobrevoltajes

En el análisis del modelo del tramo más significativo del alimentador se identifican varias propuestas según el rango de pico de corriente del rayo que son de: 10kA, 20kA y 30kA, presentados anteriormente en la Tabla

No. 15, el objetivo de analizar estas propuestas es determinar el efecto de actuación de los descargadores cada cierta distancia como también la incidencia de los esquemas elegidos que se incorporan en la línea.

La primera propuesta es simular el modelo del Gráfico No. 70, con un impacto directo en la fase B y un pico de corriente de rayo de 10kA en el poste #4, para esta simulación los aisladores cumplen un papel muy importante debido a que al llegar al un valor mayor al CFO el aislador falla con lo que se puede identificar cada cuantos metros es conveniente colocar los descargadores de Oxido Metálico a lo largo de la línea, y así evitar que fallen al momento del impacto del rayo y provoquen la apertura del elemento de protección de sobrecorriente asociado a los esquemas.

Los resultados obtenidos del escenario 1 se presentan en la Tabla No. 17, tanto los valores de voltaje pico en lado de medio voltaje, como la corriente pico del descargador y con ello se determina si opera o no el fusible en los transformadores monofásicos como en el esquema trifásico. Es importante indicar que la operación del fusible implica una selectividad de falla es decir que resulta afectada solo el área en la que incide el rayo, esto permite también la identificación de la falla.

Tabla No. 17: Resultados del Modelo Completo para un Pico de Corriente de Rayo de 10kA

TABLA DE RESULTADOS DEL MODELO COMPLETO									
Vp. _{RAYO} = Voltaje Pico del Rayo Rp=Resistencia de Puesta a tierra Ip. _{RAYO} =Corriente Pico del Rayo				Ip. _{DESC} = Corriente Pico en el Descargador Vp. _{LM} = Voltaje Pico en el Lado de Media					
Impacto en la línea trifásica fase B; Ip. _{RAYO} : 10kA; Vp. _{RAYO} : 117.89kV; Rp: 25[Ω]; Transformadores Monofásico de 25kVA y Transformadores Trifásico de 30kVA; Vano #5									
TRONCAL TRIFASICO	Tramo	Distancia entre vano	Fases	Sin descargadores			Con descargadores		
				CASO B3 - D			CASO B3 - D		
				Vp. _{LM} [kV]	Ip. _{Des} [kA]	Operación fusible	Vp. _{LM} [kV]	Ip. _{Des} [kA]	Operación fusible
	Poste #1	0	A	49.69	*	*	31.71	1.02	*
		B	96.25	*	*	39.42	2.22	*	
		C	33.07	*	*	18.01	1.22	*	
Poste #2	114.85	A	49.82	*	*	26.91	*	*	
		B	99.85	*	*	46.72	*	*	
		C	33.10	*	*	21.90	*	*	
Poste #3	167.02	A	48.24	*	*	26.28	0.259	*	
		B	93.33	*	*	57.50	1.59	*	
		C	31.40	*	*	18.51	0.259	*	
Poste #4	118.64	A	47.03	*	*	24.34	*	*	
		B	94.94	*	*	65.46	*	*	

			C	30.62	*	*	24.42	*	*
Poste #5	161.07	A	40.79	*	*	23.88	0.511	*	
		B	97.01	*	*	33.43	36.63	*	
		C	30.21	*	*	19.73	0.511	*	
Poste #6	91.82	A	35.20	*	*	23.42	*	*	
		B	95.93	*	*	67.41	*	*	
		C	30.27	*	*	25.74	*	*	
Poste #7	243.53	A	40.75	*	*	26.25	*	*	
		B	92.99	*	*	65.21	*	*	
		C	31.03	*	*	25.17	*	*	
Poste #8	120.46	A	39.45	*	*	26.46	0.229	*	
		B	91.97	*	*	55.32	1.620	*	
		C	31.14	*	*	21.31	0.232	*	
Poste #9	198.17	A	37.62	*	*	25.69	*	*	
		B	90.89	*	*	53.36	*	*	
		C	31.86	*	*	22.11	*	*	
Poste #10	137.44	A	38.52	0.649	NO	25.73	0.141	NO	
		B	91.23	4.346	NO	57.86	1.99	NO	
		C	39.16	0.026	NO	27.13	0.061	NO	

RAMAL #1 MONOFASICO	Poste #1	251.45	B	45.86	1.92	NO	37.96	1.16	NO
	Poste #2	138.64		44.90	*	*	37.40	*	*
	Poste #3	75.24		35.60	*	*	32.01	*	*
	Poste #4	123.15		38.81	*	*	31.70	*	*
	Poste #5	149.88		36.80	*	*	30.20	*	*
	Poste #6	68.71		36.52	0.55	NO	28.68	0.376	NO

Fuente: Autoría Propia

*No se encuentra modelado el descargador ni el fusible porque la estructura del poste no cuenta con estos elementos.

En resumen se obtuvo como resultados de la simulación de un rayo de pico de corriente de 10kA, la red no es afectada ya que el aislador tipo Pin ANSI 55-5 de un CFO de 140kV, no falla debido a que el voltaje producido por el rayo en la línea no supera este valor y en cuanto a los esquemas elegidos no se produce ninguna apertura de los fusibles por lo tanto los descargadores cumplen su función y el fusible no opera con este valor de corriente, con este resultado se determina que para un pico de corriente de 10kA no es necesario colocar descargadores a lo largo de la línea.

En el segundo escenario se simula el modelo anterior presentado en el Gráfico No. 70, pero con un impacto directo con un pico de corriente de 20kA, donde se aplica la misma metodología de la propuesta anterior, y se presenta los resultados obtenidos en la Tabla No. 18, en la que constan los valores de voltaje en el lado de MV, los valores de corriente y el efecto en los aisladores con y sin descargadores a lo largo de la línea.

Tabla No. 18: Resultados del Modelo Completo para un Pico de Corriente de Rayo de 20kA

TABLA DE RESULTADOS DEL MODELO COMPLETO									
Vp. _{RAYO} = Voltaje Pico del Rayo Rp=Resistencia de puesta a tierra Ip. _{RAYO} =Corriente pico del rayo			Ip. _{DESC} = Corriente Pico en el Descargador Vp. _{LM} = Voltaje Pico en el lado de Media						
Impacto en la línea trifásica fase B; Ip._{RAYO}: 20kA; Vp._{RAYO}: 169.53kV; Rp: 25[Ω]; Transformadores Monofásico de 25kVA y Transformadores Trifásico de 30kVA; Vano #5									
TRONCAL TRIFASICO	Tramo	Distancia entre vano	Fases	Sin descargadores			Con descargadores		
				CASO B3 - D			CASO B3 - D		
				Vp. _{LM} [kV]	Ip. _{Des} [kA]	Operación fusible	Vp. _{LM} [kV]	Ip. _{Des} [kA]	Operación fusible
	Poste #1	0	A	59.67	*	*	35.72	2.29	*
B			100.34	*	*	38.42	4.451	*	
C			43.057	*	*	21.74	2.509	*	
Poste #2	114.85	A	58.97	*	*	31.25	*	*	
		B	95.43	*	*	60.43	*	*	
		C	42.26	*	*	23.87	*	*	
Poste #3	167.02	A	56.66	*	*	30.10	0.397	*	
		B	102.32	*	*	69.20	2.505	*	
		C	44.22	*	*	20.98	0.259	*	



Poste #4	118.64	A	55.55	*	*	30.70	*	*
		B	103.10	*	*	89.42	*	*
		C	43.80	*	*	31.46	*	*
Poste #5	161.07	A	48.21	*	*	25.30	0.511	*
		B	140.00	*	*	34.62	63.34	*
		C	39.031	*	*	20.70	0.511	*
Poste #6	91.82	A	49.12	*	*	30.19	*	*
		B	111.69	*	*	89.51	*	*
		C	51.44	*	*	31.04	*	*
Poste #7	243.53	A	46.18	*	*	31.79	*	*
		B	105.62	*	*	88.61	*	*
		C	48.20	*	*	31.51	*	*
Poste #8	120.46	A	43.36	*	*	27.70	0.203	*
		B	102.06	*	*	69.75	2.73	*
		C	45.24	*	*	25.53	0.154	*
Poste #9	198.17	A	40.57	*	*	27.12	*	*
		B	92.89	*	*	63.30	*	*

			C	37.40	*	*	26.75	*	*
	Poste #10	137.44	A	45.84	0.772	NO	34.15	0.218	NO
			B	94.78	4.25	NO	67.95	2.63	NO
			C	47.39	0.046	NO	34.07	0.066	NO
RAMAL #1 MONOFASICO	Poste #1	251.45	B	44.89	1.82	NO	47.29	2.06	NO
	Poste #2	138.64		44.13	*	*	47.55	*	*
	Poste #3	75.24		36.12	*	*	37.29	*	*
	Poste #4	123.15		36.71	*	*	36.95	*	*
	Poste #5	149.88		35.19	*	*	34.84	*	*
	Poste #6	68.71		34.05	0.555	NO	34.20	0.719	NO

Fuente: Autoría Propia

*No se encuentra modela el descargador ni el fusible porque la estructura del poste no cuenta con estos elementos.

En esta propuesta donde el escenario es sin descargadores a lo largo de la línea y con un pico de corriente de 20kA, se obtiene como resultado la falla del aislador más cercano al impacto del rayo, que se encuentra en el poste #5, el aislador falla debido a que el voltaje producido en la línea es mayor al CFO, y en cuanto a los esquemas de conexión elegidos la corriente no afecta a los fusibles del tramo trifásico ni al del tramo monofásico, lo que evita que existan zonas que se queden sin suministro eléctrico. El escenario que comprende la instalación de descargadores cada 290m esto como resultado de simulaciones previas en las que se determinó la distancia optima tomando en cuenta la longitud de los vanos en estudio, y con el mismo pico de corriente se obtuvo la protección del aislador más cercano y la disminución los voltajes que se presentan a lo largo de la línea trifásica.

En el último escenario se aplica un pico de corriente de 30kA, donde se analiza el efecto de los aisladores y los elementos de protección de sobrecorriente sin descargadores, y con descargadores cada 290m en la línea trifásica, los resultados obtenidos se presentan en la Tabla No. 19.

Tabla No. 19: Resultados del Modelo Completo para un Pico de Corriente de Rayo de 30kA

TABLA DE RESULTADOS DEL MODELO COMPLETOS									
Vp. _{RAYO} = Voltaje Pico del Rayo Rp=Resistencia de puesta a tierra Ip. _{RAYO} =Corriente pico del rayo					Ip. _{DESC} = Corriente Pico en el Descargador Vp. _{LM} = Voltaje Pico en el lado de Media				
Impacto en la línea trifásica fase B; Ip._{RAYO}: 30kA; Vp._{RAYO}: 208.27 kV; Rp: 25[Ω]; Transformadores Monofásico de 25kVA y Transformadores Trifásico de 30kVA; Vano #5									
TRONCAL TRIFASICO	Tramo	Distancia entre vano	Fases	Sin descargadores			Con descargadores		
				CASO B3 - D			CASO B3 - D		
				Vp. _{LM} [kV]	Ip. _{Des} [kA]	Operación fusible	Vp. _{LM} [kV]	Ip. _{Des} [kA]	Operación fusible
	Poste #1	0	A	59.13	*	*	41.60	3.98	*
B			112.57	*	*	39.73	3369.91	*	
C			42.52	*	*	34.00	3.36	*	
114.85		A	61.08	*	*	35.66	*	*	
		B	106.32	*	*	77.79	*	*	
		C	44.37	*	*	40.17	*	*	
167.02		A	59.02	*	*	33.12	0.597	*	
		B	108.42	*	*	72.97	2.541	*	
		C	42.18	*	*	49.18	0.259	*	

	Poste #4	118.64	A	57.73	*	*	45.48	*	*
			B	116.65	*	*	106.89	*	*
			C	40.78	*	*	46.94	*	*
	Poste #5	161.07	A	51.01	*	*	26.30	0.80	*
			B	140.00	*	*	35.21	84.56	*
			C	39.03	*	*	25.35	0.511	*
	Poste #6	91.82	A	42.76	*	*	45.27	*	*
			B	110.59	*	*	107.24	*	*
			C	32.81	*	*	45.51	*	*
	Poste #7	243.53	A	45.33	*	*	45.84	*	*
			B	108.16	*	*	106.517	*	*
			C	34.45	*	*	45.85	*	*
	Poste #8	120.46	A	43.81	*	*	32.41	0.242	*
			B	107.16	*	*	85.58	3.547	*
			C	34.16	*	*	39.59	0.275	*
	Poste #9	198.17	A	41.83	*	*	43.80	*	*

			B	106.38	*	*	73.73	*	*
			C	34.89	*	*	43.52	*	*
	Poste #10	137.44	A	46.00	0.815	NO	66.74	0.293	NO
			B	100.69	5.38	SI	79.83	3.376	NO
			C	46.30	0.069	NO	64.47	0.416	NO
RAMAL #1 MONOFASICO	Poste #1	251.45	B	52.53	2.57	NO	53.95	2.75	SI
	Poste #2	138.64		52.43	*	*	53.80	*	*
	Poste #3	75.24		41.61	*	*	44.26	*	*
	Poste #4	123.15		42.54	*	*	41.45	*	*
	Poste #5	149.88		42.09	*	*	41.68	*	*
	Poste #6	68.71		42.02	0.822	NO	47.25	0.989	NO

Fuente: Autoría Propia

*No se encuentra modelado el descargador ni el fusible porque la estructura del poste no cuenta con estos elementos.

El resultado de esta simulación permite observar que los valores de voltaje y corriente son mucho más altos, por lo cual se produce la falla del aislador del poste más cercano al rayo, y la apertura del fusible de la fase B del transformador trifásico que se encuentra al final del tramo. El efecto que produce este rayo en el tramo monofásico no es severo ya que no fallan los aisladores como tampoco produce la apertura del fusible de los esquemas monofásico. Después de haber realizado este análisis se colocó los descargadores cada 290m aproximadamente en la red trifásica para así disminuir este efecto y se logro bajar los valores de voltaje evitando la falla del aislador continuo al impacto del rayo como se presento en la Tabla No. 19. Pero la onda residual que viaja a lo largo de la línea trifásica, llega al tramo monofásico el cual presenta un cambio de impedancia con lo que la onda se refleja e incrementa el valor pico en ese punto y produce la operación del descargador del transformador y por lo tanto se funde el fusible del ramal monofásico más cercano, al fundirse este fusible y al tener este una curva de operación más rápida que el reconectador instalado aguas arriba no origina la apertura del reconectador evitando así una interrupción momentánea, pero se incurre en la apertura permanente del fusible del transformador,.

Adicionalmente se simuló el impacto directo del rayo al tramo monofásico con un pico de corriente de 20kA y 30kA, con lo que se observó que el efecto que produce el rayo en el troncal monofásico es la apertura del fusible más la falla del aislador, con lo que se comprueba que el descargador asociado al fusible actúa. Al simular el impacto en el tramo monofásico y con descargadores en la red trifásica no se observo ningún efecto positivo

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1 CONCLUSIONES

- De las revisiones bibliográfica se determino 9 esquemas de conexión de los descargadores para redes monofásicas y 2 para redes trifásicas y de las inspecciones en campo en el Alimentador Pilishurco se determino 1 esquema de conexión de los descargadores en la red monofásico y 1 en la red trifásica, para lo cual se analizaron como variables la forma, la ubicación del descargador y del fusible, el orden y forma de conexión de la bajante en medio voltaje (chicote MV), la longitud y sección del cable de MV y de la bajante de puesta a tierra, como también la resistencia de puesta a tierra, el nivel básico de aislamiento BIL y la curva de operación del descargador.

- El esquema más factible para la zona de mayor probabilidad de rayos en el Alimentador Pilishurco es el Caso B3 que está constituido por un transformador monofásico con el fusible al lado de la fuente y con conexión de puesta a tierra mallada al tanque y al neutro y el Caso D que está conformado por el transformador trifásico con el fusible al lado de la fuente, estos dos esquemas tienen el mismo objetivo el cual es permitir la selectividad de la zona de apertura. Para la selección se analizo el comportamiento de cada uno de los esquemas frente a sobrevoltajes atmosféricos, mediante los resultados de simulaciones en Matlab, valorando el nivel de protección que brindan a las bobinas del transformador y la incidencia en los elementos de protección de sobrecorriente asociados.

- Al tener el fusible al lado de la fuente este permite que la corriente producida por el descargador funda el fusible externo que protege al transformador, obteniendo así una selectividad con las protecciones aguas arriba, disminuyendo así los kVA`S que quedan fuera de servicio.
- Se calculó la probabilidad de descargas al año según el nivel ceraúnico en Ambato proporcionado por la DAC (Dirección de Aviación Civil), por lo que Ambato tiene una probabilidad de 8.538 Descargas/100Km/año en las zonas más altas, por lo que la zona de mayor probabilidad de rayos se encuentra en la cima del alimentador Pilishurco,
- Las estadísticas de rayos a nivel mundial infieren que los valores de corriente pico con una mayor probabilidad ocurrencia están en el rango de 10kA a 30kA, razón por la cual se analizaron los resultados de las simulaciones de un impacto en la red trifásica de una descarga con los picos de corriente de 10kA, 20kA y 30kA.
- Para picos de corriente de 10kA no se observa efectos en la red troncal trifásica ni ramales monofásicas, es decir no superan 140kV que es el CFO (Critical Flash Overvoltage) de los aisladores de la línea y no se funden los fusibles del transformador más cercano al impacto, razón por lo cual se concluye que esta red está diseñada para soportar sin inconvenientes descargas de 10kA. Por otra parte si impacta en la red trifásica una descarga con un pico de corriente de 20kA provoca una falla en el aislador más cercano al impacto con un voltaje de 140kV, también se demostró que no se funde el fusible más cercano al impacto.

- La resistencia de puesta a tierra asociada a los descargadores cumple un papel muy importante cuando la línea es impactada por un pico de corriente igual a 30kA. El valor de la resistencia de puesta a tierra incide en el valor del pico de voltaje residual que viaja por la línea, por lo que en las simulaciones se consideró 25 [Ω] de resistencia de puesta a tierra y se obtuvo voltajes que superaron el CFO (Critical Flash Overvoltage) de los aisladores, provocando así la falla del aislador de la estructura de soporte más cercano al impacto en dirección a la carga, con lo que se produce la apertura del fusible aguas arriba que se encontraba aproximadamente a una distancia de 791.42mts de la fase donde impactó el rayo, mientras que en el ramal monofásico más cercana no se produce ninguna incidencia considerable.
- La distancia entre los descargadores según el resultado obtenido en las simulaciones es de 290m aproximadamente en la red trifásica del alimentador, esta distancia es efectiva para descargas con un pico de corriente de 30kA, ya que evita que el aislador cercano al rayo falle, pero al existir mayor cantidad de descargadores de oxido metálico actúan los más cercanos al impacto hasta desaparecer el sobrevoltaje provocando así que el fusible del tramo monofásico más cercano se funda, dejando sin servicio la zona que alimenta el transformador asociado al fusible.
- El descargador de la fase donde impacta el rayo con un pico de corriente de 20kA y 30kA falla ya que las corrientes producidas por las descargas son mayores a la que soportan los descargadores de oxido Metálico que fueron seleccionados en el diseño para el Alimentado Pilishurco por lo cual se debe cambiar a un descargador Heavy Dutty para mayor protección.

- Mediante este análisis se determina que se puede disminuir los índices de FMIK y TTIK ya que al colocar el fusible al lado de la fuente disminuye los kVA'S fuera de servicio y al ubicar el lugar exacto de la falla disminuye el tiempo de búsqueda para realizar la acción correctiva en la red.

6.2 RECOMENDACIONES

- Utilizar el esquema de conexión del Transformador Convencional con el Fusible al Lado de la Fuente con Bajante de Tierra Mallada al Tanque y al Neutro en la zona de mayor probabilidad de descargas que en este caso es la cima del alimentador, con el propósito de disminuir los índices de servicio técnico mediante la selectividad de las zonas que se quedan sin servicio.
- Colocar cada 290m dependiendo de la distancia del vano un descargador de oxido metálico en el cerro del Alimentador Pilishurco.
- Realizar inspecciones para verificar que las puestas a tierra de los descargadores como de los transformadores se encuentren con una resistencia menor a 25Ω .
- Realizar un estudio de los registros estadísticos de las descargas atmosféricas en la zona de concesión de la EEASA, para determinar las características del rayo con mayor ocurrencia en esta zona, ya que los descargadores ubicados a lo largo de la línea no garantizan la protección de la misma para corrientes de descarga superiores a 30kA.

BIBLIOGRAFÍA Y NETGRAFÍAS

- [1] M. MORALES, «ANÁLISIS DE FALLAS DESCONOCIDAS EN EL ALIMENTADOR PILISHURCO 2011-2012 DOM EEASA,» AMBATO, 2012.
- [2] CONELEC, JUNIO 2013. [En línea]. Available: http://www.conelec.gob.ec/normativa_detalle.php?cd_norm=23.
- [3] SCHNEIDER ELECTRIC , «PROTECCIONES CONTRA LAS SOBRETENSIONES,» de CAPITULO I PROTECCIONES CONTRA LAS SOBRETENSIONES, 2010.
- [4] ABB ASEA BROWN BOVERI, S.A., «PROTECCIONES CONTRA SOBRETENSIONES,» 2010.
- [5] D. G. MONTALUISA MONTALUISA, ANÁLISIS DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO PARA PRIMARIOS DE DISTRIBUCIÓN, 2010`.
- [6] COOPER POWER SYSTEMS, ELECTRICAL DISTRIBUTION SYSTEM PROTECTION (MANUAL), UNITED STATES: COOPER, 1990, pp. 180-188.
- [7] D. FULCHIRON, «SOBREVOLTAJE Y COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO EN MEDIO Y ALTO VOLTAJE.,» de CUADERNO TECNICO N° 151, FEBRERO, 1995.
- [8] CONGRESO DE PROTECCIONES DE SOBREVOLTAJES ATMOSFÉRICOS, PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS, 2013.
- [9] J. WOODWORTH, «WHAT IS THE VALUE OF A DISTRIBUTION ARRESTER,» ARRESTER WORKS, NEW YORK, 2012.
- [10] RUELAS GOMEZ, MARZO 2013. [En línea]. Available: <http://www.ruelsa.com/notas/tierras/pe50.html>.
- [11] F. ECHEVERRIA y E. PRECIADO, «ESTUDIO DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD EN SUBESTACIONES DEL SISTEMA NACIONAL DE TRANSMISIÓN,» TESIS, QUITO, 2008.

- [12] P. SOLA, «CALCULO DE TRANSITORIOS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN A 230 KV CON APLICACIÓN A LA LÍNEA QUEVEDO - TOTORAS,» QUITO, 2010.
- [13] ARRESTERFACTS-001, «ARRESTERWORKS.COM,» 2012. [En línea]. [Último acceso: 15 OCTUBRE 2012].
- [14] H. V. HEINRICH C., «DIAGNOSTIC AND MONITOTORING OF METAL OXIDE SURGE,» 2001.
- [15] J. WOODWORTH, «ARRESTER DISCONNECTOR,» ARRESTERWORK, NEW YORK, 2008.
- [16] J. A. CIPOLI, INGENIERÍA DE DISTRIBUCIÓN, San Paulo, 1974.
- [17] COOPER POWER SYSTEMS, «THE D-LINK FUSE - NEW RATINGS AND EXPLANATIONS OF SURGE DURABILITY,» COOPER POWER SYSTEMS, WISCONSIN, 1992.
- [18] IEEE STD. 1410, «IEEE GUIDE FOR IMPROVING THE LIGHTNING PERFORMANCE OF ELECTRIC POWER OVERHEAD DISTRIBUTION LINES,» NEW YORK, 2004.
- [19] M. PAOLONE, «MODELING OF LIGHTNING-INDUCE VOLTAGES ON DISTRIBUTION NETWORK FOR THE SOLUTION OF POWER QUALITY PROBLEMS, AND RELEVAN IMPLEMENTATION IN A TRANSIENT PROGRAM,» UNIVERSIDAD OF BOLONGA, 2001.
- [20] A. GREENWOOD, ELECTRICAL TRANSIENTS IN POWER SYSTEMS, UNITED STATES: JOHN WILEY, 1991.
- [21] P. A. G. MENDOZA, «TESIS ESTUDIO DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO PARA LA LÍNEA AÉREA EN 34,5 KV PLANTA ESTACIÓN PRINCIPAL MORICHAL-SUBESTACIÓN N° 3 MORICHAL,» VENEZUELA-CARACAS, 2010.