MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
"Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ"

MAESTRÍA DE ELECTROMECÁNICA

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE MASTER EN ELECTROMECÁNICA

SISTEMA DE PROTECCIONES CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN LA LÍNEA ELÉCTRICA DE LA MINA YAGRUMAJE

ADOL HERNÁNDEZ ROJAS

MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
"Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ"

MAESTRÍA DE ELECTROMECÁNICA

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE MASTER EN ELECTROMECÁNICA

SISTEMA DE PROTECCIONES CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN LA LÍNEA ELÉCTRICA DE LA MINA YAGRUMAJE

AUTOR: ING. ADOL HERNÁNDEZ ROJAS

TUTORES: M. Sc. IGNACIO ROMERO RUEDA
Dr. C. ANGEL O. COLUMBIÉ NAVARRO

MOA, 2013
AÑO 54 DEL TRIUNFO DE LA REVOLUCIÓN

Agradecimientos
A todos los que han contribuido para que este trabajo se realizara.

Dedicatoria
A Mi Madre.

RESUMEN

La incidencia de descargas atmosféricas en el esquema eléctrico de media tensión de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara ha provocado múltiple averías, situación que denota un mal funcionamiento de las protecciones instaladas para eliminar las sobretensiones, que por estas causas, se inducen en la línea eléctrica que lleva el suministro eléctrico a la mina. El trabajo propone determinar el comportamiento de los descargadores de óxido metálico (ZnO) en una línea aérea de distribución de media tensión 6.3 kV con neutro aislado, bajo la influencia de una descarga atmosférica simulada con una onda característica de 1,2-50 μ/s, empleando MATLAB. Simulando sobretensiones de diferentes niveles, se obtiene y compara los resultados del sistema variando el número de descargadores entre el punto de la descarga atmosférica y las cargas eléctricas.

En el capítulo uno se realiza un análisis de la bibliografía relacionada con el tema de investigación, haciendo hincapié en los métodos utilizados para la selección y ubicación de los descargadores valvulares y las aplicaciones computacionales para su modelación.

En el capítulo dos se realizó una descripción detallada de la línea aérea y las características de las protecciones instaladas. A partir de esto se realiza un nuevo elemento y se ajustan los ya existentes en el toolbox SymPowerSystem creando un modelo general para evaluar la acción de las protecciones, mediante la simulación del comportamiento de la línea frente a diferentes niveles de sobretensión. Los resultados de las simulaciones permitieron seleccionar mediante una comparación técnico económica el modelo que emplea tres descargadores valvulares.

En el capítulo tres se realizó una propuesta técnica a partir de los resultados del capítulo dos y se determinó el monto total de la inversión en 154 911,04 CUC, la propuesta económica se validó mediante el método de la Comparación Relativa.

SUMMARY

The incidence of atmospheric discharges in the half tension electric outline of the Company Ernesto Che Guevara has caused multiple faults; this situation represents a bad operation of the protections installed to eliminate the surges that these induce in the electric line feeding the mine. The work intends to determine the behavior of the metallic unloaders (ZnO) in a half tension distribution airline of 6,3 kV with neuter isolated, under the influence of a simulated atmospheric discharge with a characteristic wave of 1,2-50 μ/s, using MATLAB. Simulating surges of different levels, there are obtained and compare the results of the system varying the number of unloaders between the point of the atmospheric discharge and the electric loads. First chapter an analysis of the bibliography related with the investigation is carried out, mainly in the methods used for the selection and location of the unloaders and the computers applications for their modeling.

In second chapter a detailed description of the airline and the characteristics of the installed protection were carried out. From this a new model is developed and those that already exist in the toolbox SymPowerSystem are fixed creating a general model able to evaluate the protection operation by means of the simulation the behavior of the line before different levels of surge. The results of the simulations allowed selecting by means of a economic comparison technic the pattern that uses three unloaders.

In the third chapter a technical proposal starting from the results of the chapter two was carried out and it was determined the total quantity of the inversion in 154911,04 CUC, the economic proposal was validated by means of the method of the Relative Comparison.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN GENERAL. 1
Capítulo 1. Marco teórico-referencial de las protecciones contra descarga ATMOSFÉRICAS 5
1.1 Introducción 5
1.2 Estado del arte 5
1.3 Protección contra rayos y sobretensiones transitorias externas 8
1.4 Elementos de protección de líneas aéreas 9
1.4.1 El Hilo de Guarda 10
1.4.2 Pararrayos valvulares 12
1.4.2.1 Selección de pararrayos. 17
1.4.2.2 Tensión máxima de operación continúa (MCOV). 17
1.5 Sobretensiones externas. 19
1.5.1 Descargas atmosféricas directas e indirectas 20
1.5.2 Parámetros de las descargas eléctricas 20
1.5.3 Corrientes eléctricas descargadas por un rayo 20
1.5.4 Normas existentes para normalizar la onda de tensión 22
1.6 Clasificación de los sistemas según la conexión a tierra del neutro 24
1.6.1 Sistemas modernos de protección contra descargas atmosféricas 25
1.6.1.1 Sistema de Arreglo de Disipación (DAS). 25
1.6.1.2 Ionizador DAS 27
1.6.1.3 El Sistema desviador Spline Ball (SBDS). 27
1.6.1.4 Electrodo de Tierra CHEM-ROD 28
1.6.1.5 El Sistema Disipador Dual (DDS) 30
1.7 Conclusiones Capítulo 1 31
CAPÍTULO 2. SIMULACIÓN DE SOBRETENSIONES EN LA LÍNEA ANTE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS 33
2.1 Introducción 33
2.2 Caracterización de la red eléctrica de la mina Yagrumaje en la Empresa Ernesto Che Guevara 33
2.2.1 Esquema de alimentación de la línea aérea 34
2.2.2 Levantamiento topográfico de la línea 35
2.2.3 Sistema actual de protecciones contra descargas atmosféricas de la línea. 36
2.3 Determinación de los parámetros eléctricos de la línea aérea de la mina Yagrumaje 37
2.4 Simulación en MATLAB de los elementos del sistema eléctrico 41
2.4.1 Simulación en MATLAB de sobretensión para diferentes configuraciones de los descargadores valvulares. 46
2.4.1.1 Sobretensión en la línea protegida por un descargador valvular. 48
2.4.1.2 Sobretensión en la línea protegida por dos descargadores valvulares. 51
2.4.1.3 Sobretensión en la línea protegida por tres descargadores valvulares. 54
2.4.1.4 Sobretensión en la línea protegida por cuatro descargadores valvulares. 57

2.5 Conclusiones capítulo 2 61
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN PROPUESTO 62
3.1 Introducción 62
3.2 Validación técnica de la propuesta que se implementa 62
3.3 Análisis económico. 66
3.3.1 Costo total de la inversión para la tercera variante 66
3.3.2 Validación de la propuesta económica 69
3.4 Conclusiones capítulo 3 70
CONCLUSIONES GENERALES 72
RECOMENDACIONES 73
BIBLIOGRAFÍA. 74

INTRODUCCIÓN GENERAL.

En la actualidad, es una innegable realidad los bruscos cambios climáticos que sufre nuestro planeta, por causas naturales, antropogénicas o ambas a la vez. Aparejado a esto es notable, entre otros fenómenos y desastres climatológicos, el aumento progresivo de las tormentas y su intensidad eléctrica. Se estima que en nuestro planeta existen simultáneamente unas 2000 tormentas y cerca de 100 rayos de Nube a Tierra cada segundo. Lo que en total representa unas 45000 tormentas diarias y unos 9 millones de descargas atmosféricas cada día.

La Empresa Comandante Ernesto Che Guevara (ECG) se encuentra geográficamente situada en una región de alto nivel ceráunico, por ser Cuba un país tropical es necesario considerar un sistema de protección eficiente contra descargas atmosféricas en la línea aérea que lleva el suministro eléctrico a la mina Yagrumaje de la Empresa ECG, para evitar las afectaciones que estas provocan en el proceso productivo de la Empresa.

En la Empresa se concibió como protección contra el impacto directo de las descargas eléctricas, un sistema basado en puntas de Franklin, distribuido por el área, colocados en chimeneas, las torres de alumbrado y otras específicas para este fin. Otra de las medidas tomadas fue montar descargadores valvulares en seis exahuster, tres en los exahuster de la planta de hornos y tres en los molinos de la planta de molienda. Además en la línea aérea de la mina, que es la encargada de llevar la energía a las excavadoras, el sistema de protección se basa en un cable de guarda convencional. Este método cumplió con éxito sus funciones cuando los yacimientos en los que se enclavaban las excavadoras eran cercanos a la planta de recepción y por tanto las líneas eran más cortas y de menor altitud sobre el nivel del mar. En la actualidad producto a las averías continuas este sistema no protege eficazmente los equipos que son alimentados por esta línea, además se producen sobretensiones que afectan los motores conectado a la misma sección de barra que alimenta la planta de secadero, molinos y hornos.

Otro factor influyente es el constante movimiento de las excavadoras por el laboreo minero, esto trae como consecuencia que no se actualice el sistema de protección contra descargas atmosféricas requerido en esta línea.

Todas estas deficiencias del sistema actual contra descargas eléctricas (Rayos) mencionadas anteriormente, impone un análisis detallado de los diferentes métodos de protección implementados a nivel mundial, con el objetivo de aumentar la confiabilidad del sistema de suministro Eléctrico de la mina.

Como se explicó las sobretensiones originadas por el impacto directo de un rayo en la línea de la mina Yagrumaje, afectan los diferentes equipos eléctricos de la planta de secaderos, que están asociadas a ellas por medio de las subestaciones 2SD. Por esta razón es factible analizar la selección de los descargadores valvulares actualmente instalados en estas subestaciones. Los elementos planteados, evidencian la necesidad de realizar una corrección en el sistema de protección contra sobretensiones por descargas atmosféricas en la línea aérea de la mina Yagrumaje.

Situación Problemática:

- La continua ocurrencia de procesos transitorios electromagnéticos provocan averías en los motores sincrónicos conectados a la subestación 2SD y en los elementos de la línea aérea que suministra la energía eléctrica a la mina Yagrumaje, aspecto que denota un mal funcionamiento del sistema de protección contra descargas atmosféricas instalado actualmente.

Problema de investigación.

- La ineficacia del sistema de protección contra descargas atmosféricas aplicado en el circuito de la línea aérea que alimenta la mina de Yagrumaje, imposibilita la corrección de los niveles de sobretensiones atmosféricas que garantice un suministro eléctrico confiable y de calidad.

La **hipótesis científica** del trabajo parte del hecho:

- Si se analizan las posibles sobretensiones en el circuito de la línea aérea de media tensión de la mina Yagrumaje es posible la corrección del sistema de protecciones contra descarga atmosférica que asegure un suministro de calidad y se mejore la eficacia del sistema.

El Objetivo del presente trabajo consiste en:

Simular las descargas atmosféricas en la línea aérea de la mina Yagrumaje para diferentes condiciones que posibilite determinar la mejor variante del sistema de protección para disminuir las sobretensiones inducidas en las redes de media tensión de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Para dar cumplimiento al objetivo fueron formulados los siguientes Objetivos Específicos:

- Describir las características eléctricas, técnicas, constructivas y geográficas de la línea aérea de la mina Yagrumaje y el sistema de protección contra descargas atmosféricas.
- Simular el comportamiento de la protección contra descarga atmosférica en la línea aérea de la mina Yagrumaje cuando se inducen sobretensiones para diferentes configuraciones del sistema de protecciones.
- Selección del sistema de protección contra descargas atmosférica por un análisis técnico económico de las variantes propuestas.

Objeto de estudio:

- Las protecciones contra descargas atmosféricas en la línea aérea de la mina Yagrumaje.

Campo de acción:

- Las protecciones contra descargas atmosféricas.

Tareas propuestas:

- Revisión del estado del arte sobre las descargas atmosféricas y las protecciones eléctricas en este campo, especificando para líneas aéreas de media tensión.
- Simular el comportamiento del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea de media tensión para diferente niveles de tensión.

- Obtener el resultados del comportamiento de las sobretensiones en la línea protegida por un descargador valvular, dos descargadores y así sucesivamente hasta que se determine la mejor variante de protección.
- Proponer técnicamente la configuración del sistema de protecciones contra descargas atmosféricas.
- Demostrar que el sistema de protecciones propuesto es viable técnico y económicamente.

Metodología de la investigación:

- El método histórico-lógico en el estudio de las protecciones contra descargas atmosféricas en los sistemas eléctricos de baja tensión.
- El método de análisis y síntesis al procesar la información de los reportes de fallas, las estadísticas meteorológicas y geográficas de la línea que se pretende proteger.
- Métodos empíricos como: estadísticos, observación directa, consulta con especialistas del área y análisis de documentos para la recopilación de información.
- Procesamiento y análisis de la información recopilada de forma tal que permita desarrollar el método para seleccionar las protecciones adecuadas.
- Método de simulación para determinar las sobretensiones teniendo en cuenta la configuración y número de descargadores valvulares con uso del MATLAB.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO-REFERENCIAL DE LAS PROTECCIONES CONTRA DESCARGA ATMOSFÉRICAS

1.1 Introducción

Las sobretensiones que se presentan en un sistema eléctrico, de acuerdo con las causas que las producen, se pueden clasificar en sobretensiones de origen interno y sobretensiones de origen externo. Las de origen interno se deben principalmente a operación de dispositivos de desconexión y fenómenos de ferrorresonancia en el sistema. Las de origen externo se deben al contacto directo con líneas de mayor tensión y a descargas atmosféricas (Fulchiron 1994).

Este capítulo aborda el estudio de las sobretensiones provocadas por fenómenos externos (Rayo); se realiza una breve reseña de estos fenómenos, los cambios que producen en el sistema eléctrico, los daños que causan y los principales métodos de protección que existen para limitar las sobretensiones que estos producen en las líneas aéreas (Mockey 2002; Espinosa 2005; Rodríguez 2006).

1.2 Estado del arte

En el estudio realizado por Ricardo (2005) en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara se hace referencia al tema de las sobretensiones internas.

La protección contra descargas atmosféricas es un tema de gran importancia por las repercusiones económicas que puede acarrear en los sistemas eléctricos, por esta razón se han realizado un gran número de investigaciones con el objetivo de determinar el mejor método de protección en líneas aéreas.

Los principales métodos que se utilizan para la protección de los circuitos aéreos son, el hilo de guarda y los descargadores valvulares (Iie 2008; Espinosa 2009).

De estos dos métodos los investigadores concuerdan en que el primero es insuficiente para la protección contra impactos directos ya que estos solo podrán proteger el 30 % de las descargas directas que impacten la línea (Días 2005; Batista 2011).

Con respecto a los descargadores valvulares la problemática radica en determinar la correcta selección y ubicación de los mismos (Fulchiron 1994; Almirall 2004).

En los trabajos de Espinosa (2005) se propone como mejor configuración para la protección de líneas de distribución la utilización de descargadores valvulares en todas las fases. En esta investigación para una línea de 3 km se propone la instalación de los pararrayos a una distancia de 250 a 300 m. Además para la selección de la tensión nominal de los pararrayos se utilizan dos métodos fundamentales, el método de "cálculo general" y el método de "la tensión continua de operación (MCOV) comparado con la magnitud y duración de las sobretensiones temporales (TOV)" (Almirall 2004; Espinosa 2005; Herrera 2006).

En el trabajo de Turrubiates (2008) propone una metodología para la selección y ubicación de descargadores valvulares utilizando el método de cálculo general y la configuración de los mismos (localización) la realiza en dependencia del margen de protección de los mismo en función del porciento de sobretensión.

El trabajo de Groso (2007) realizado en sistemas de transmisión y distribución de la energía eléctrica se propone que los puntos donde se deben instalar los descargadores valvulares en una línea de media tensión son:

- En las estructuras con transformadores de distribución.
- En la salidas de líneas troncales.
- En todo final de línea, troncales y ramales.
- En puntos intermedios de la línea troncal.
- En estructuras de transición, si corresponde (cambio de línea convencional a protegida y viceversa).

Otro trabajo, realizado en la provincia de Las Tunas para la protección contra descargas atmosféricas en el circuito: "6220 Menéndez – La Playa" de la provincia de Las Tunas Espinosa (2009) utiliza descargadores valvulares para la protección de una línea de media tensión , además el autor realiza la ubicación de los mismo con una separación de 360

metros sin valorar en ningún momento el comportamiento de estos ante descargas atmosféricas y el nivel de las sobretensiones en los diferentes ramales de la línea.

En el caso de línea aérea se han realizado estudios de sistemas de protecciones contra descargas atmosféricas (Conte 2008; Batista 2011), trabajos concentrados en la selección y ubicación de las protecciones, ubicándolas de forma directa en la cabeza y final de las línea, sin realizar ninguna clase de experimento que validara su propuesta, además proponen la utilización del Sistema de Arreglo de Disipación (DAS) sin conocer ningún reporte de efectividad de este sistema en nuestro país, el cual según, Rison (2004) no se comportan como un sistema capaz de prevenir, sino como uno captador del rayo, por lo que su utilización no se justifica de forma económica.

Uno de los problemas fundamentales de las protecciones existentes en el sistema es que no se ha realizado ningún estudio que certifique la efectividad en función de su ubicación y la protección de los equipos asociados a la línea.

Entre todas estas investigaciones se puede observar que los criterios con respecto a la selección y ubicación de los descargadores valvulares son bastantes diversos y que la utilización de uno u otro sistema puede variar en dependencia da las características de la línea a proteger, por esta razón en la actualidad se aplican métodos para determinar la selección y ubicación de los descargadores valvulares en líneas eléctricas para conocer el nivel de protección de los mismos y para ello se utilizan herramientas computacionales.

Entre estos se encuentra (alternative Trasient Program, Electromagnetic Trasient Program, ATP/EMTP, TFLASH) estos programas presentan como inconveniente que son de difícil acceso para los investigadores y técnicos industriales (Propiedad intelectual), además se necesitan hardware computacional de altas prestaciones (Vásquez & Ruales 2005), estos programa permite modelar el comportamiento de la líneas en presencia de sobretensiones de origen atmosférico (López 2003; Alvaro 2007), sin embargo, la simulación presenta algún inconveniente, ya que es necesario escoger el modelo matemático más adecuado para cada componente atendiendo a varios criterios (Dommel 1986.), por ejemplo, al rango de frecuencias del proceso transitorio a simular, es necesario ajustar de forma detallada la mayor parte de los elementos que constituyen la línea (Caraballo 2009).

Además para el análisis de las sobretensiones por descargas atmosféricas es necesario ubicar un punto de impacto, elemento bastante difícil de determinar en la práctica.

Otro programa utilizado para la simulación de los procesos transitorios electromagnéticos es el MATLAB (Gómez 2006), el mismo cuenta con una biblioteca de dispositivos eléctricos que permite modelar sistemas eléctricos de potencia, para el estudio de sobretensiones contra descargas atmosféricas en líneas de transmisión como el CSAFILT (Soto 2006) y el caso de la protección de transformadores utilizando descargadores valvulares (Torres 2011b). Este programa tiene como ventaja su fácil acceso y se ha utilizado para diferentes investigaciones en el área de los sistemas eléctricos, además resulta ser una herramienta adecuada para ajustar y evaluar el comportamiento de las protecciones contra sobretensiones en líneas aéreas de media tensión.

1.3 Protección contra rayos y sobretensiones transitorias externas

En 1747, Benjamín Franklin inició sus experimentos sobre la electricidad. Adelantó una posible teoría de la botella de Leyden, defendió la hipótesis de que las tormentas son un fenómeno eléctrico y propuso un método efectivo para demostrarlo (Mejía 2005). Su teoría se publicó en Londres y se ensayó en Inglaterra y Francia antes incluso de que él mismo ejecutara su famoso experimento con una cometa en 1752. Inventó el pararrayo y presentó la llamada teoría del fluido único para explicar los dos tipos de electricidad atmosférica, la positiva y negativa. Desde entonces existe un gran número de dispositivos y elementos con el objetivo de impedir la caída de los rayos sobre las estructuras y sistemas eléctricos o tratar de limitar los daños por la acción de estas descargas.

Básicamente los pararrayos se dividen en dos tipos: los activos y los pasivos. Los pararrayos activos son los que tratan de facilitar el camino del líder positivo que sale de la tierra, dirigiéndolo o provocando un camino de baja impedancia. Actúan con el gradiente electrostático de la atmósfera, descargando en el lugar donde se encuentran instalados, para evitar que el rayo incida en ese punto, convirtiéndose en un elemento preventivo, además, permite que el encuentro entre el líder positivo y negativo se realice a mayor altura alejándolos del punto de mayor temperatura durante la descarga del rayo.

Los pararrayos pasivos protegen el terreno donde están instalados solamente por el efecto punta, por lo que siempre esperan el rayo para disiparlo a tierra, teniendo por tanto una mayor probabilidad de impacto.

Entre los pararrayos pasivos encontramos a:

- El pararrayos de Franklin.
- Los pararrayos de jaula.
- El pararrayos de Melsens
- Los hilos de guarda

Entre los pararrayos activos se encuentran:

- Pararrayos radioactivos.
- Pararrayos de efecto corona.

Cualquiera que sea el tipo de pararrayo adoptado para la protección de un edificio o instalación estará formado por los siguientes elementos básicos.

- Un elemento receptor colocado en la parte más alta de la instalación, puede estar constituido por puntas metálicas o conductores dispuestos de varios modos según las características y dimensiones de la instalación a proteger.
- Conductor a tierra que puede estar formado por dos o varios conductores y tiene la misión de transportar a tierra la corriente del rayo. Debe seguir el camino más corto a tierra pasando por la parte exterior y poseer la menor impedancia posible.
- Sistema de puesta a tierra a través del cual se distribuirá la corriente del rayo.

1.4 Elementos de protección de líneas aéreas

A lo largo de la historia de la Ingeniería de distribución de energía eléctrica se han empleado diversos elementos para proteger circuitos aéreos contra las sobretensiones por descargas atmosféricas. Algunos de ellos se emplean en forma restringida y otros, debido a los resultados obtenidos, han ganado la aceptación de las compañías eléctricas del

mundo. Los elementos de protección más empleados para salvaguardar el aislamiento de las líneas aéreas de distribución son en la actualidad (Espinosa 2005):

- El hilo de guarda
- Los pararrayos.

1.4.1 El Hilo de Guarda

Esta es la protección más utilizada en las líneas de distribución por lo que es necesario establecer sus características primordiales para comprender sus ventajas y desventajas.

Este es un cable aéreo (ver Figura 1.1) tendido entre mástiles, un dispositivo terminal que en lugar de un punto, ofrece una línea para la intercepción de las descargas atmosféricas, y crea una zona de protección más extensa que la de una punta simple (Yugcha 2010). Este dispositivo es usado de forma extensa por las empresas que suministran energía eléctrica, en sus estaciones y subestaciones de transformación exteriores y líneas de trasmisión .También son utilizados para proteger estructuras que contienen inflamables o explosivos, según la web (Www.Lecmex.Com. 2005).

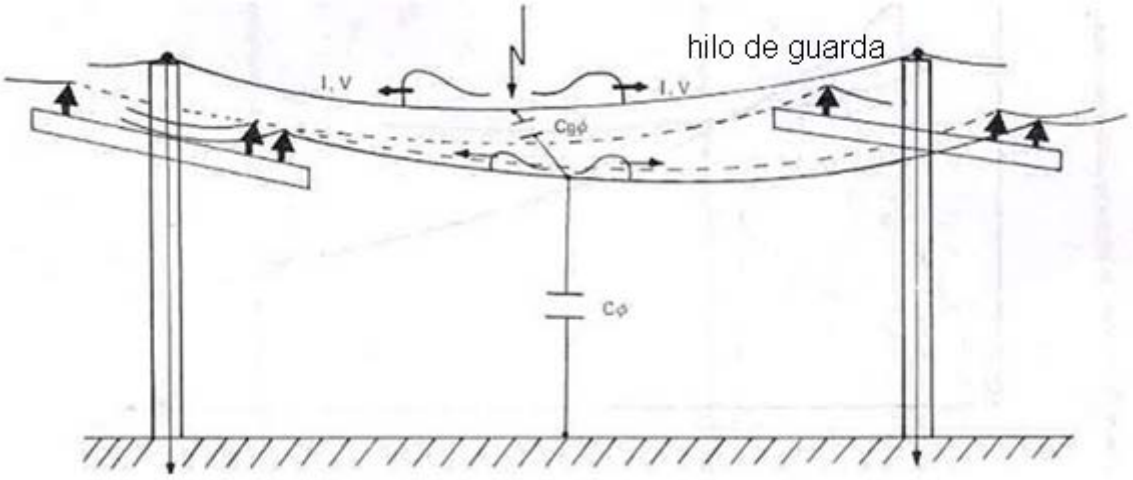


Figura 1.1 Inducción por acople de cable de guarda a conductores en línea de distribución. Fuente: (Www.Lecmex.Com. 2005)

Impactos directos de Rayo en los Hilos de Guarda

Cuando la descarga directa golpea el cable de guarda o la torre, se presentan varios fenómenos:

La onda electromagnética producida por la descarga viaja a lo largo del conductor de guarda, e induce, debido al acople inductivo y capacitivo con los conductores de fase, una sobretensión en estos últimos que puede causar un flameo fase-tierra. El factor de acople entre cables de guarda y conductores de fase es el porcentaje de tensión inducida en la fase para una sobretensión dada en el cable de guarda (Zapata 2006).

En líneas de distribución la tensión varía entre 0,1 y 0.5 %, dependiendo de la altura del cable de guarda sobre los conductores de fase. En el mejor de los casos, con ángulos de apantallamiento menores de 30º (ver Figura 1.2), el factor de acople es aún suficiente para que una descarga promedio produzca flameo.

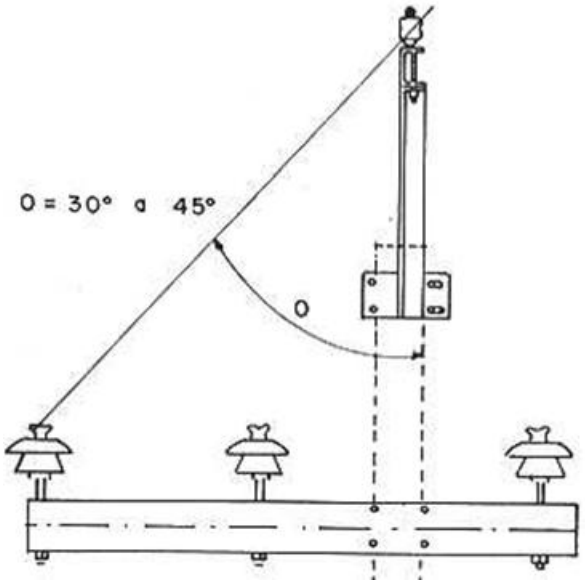


Figura 1.2 Ángulo óptimo entre el cable de guarda y los conductores de fase.
Fuente: (Ramírez 2009)

Para descargas atmosféricas de alta tasa de crecimiento de la corriente, la puesta a tierra de los extremos del cable de guarda no será suficiente para evitar una gran inducción en el conductor de fase, con lo cual el riesgo de falla en la línea de distribución por descargas

atmosféricas en el cable de guarda es muy elevado. Aunque es muy difícil establecer un porcentaje de fallas, en general se puede estimar alrededor del 70 %, que corresponde a la suposición de que las reflexiones amortiguan el 50 % de la onda incidente, de que el factor de acople sea del 10 % y que la tensión de flameo directo del aislamiento sea de 200 KV, y considerando además el aumento de la tensión de tierra correspondiente. Este resultado indica que el cable de guarda solo podría proteger contra el 30 % de las descargas que lo alcancen (Días 2005).

De este breve análisis se concluye que los cables de guarda en líneas de distribución no ofrecen una protección totalmente efectiva contra descargas directas.

1.4.2 Pararrayos valvulares

El empleo de pararrayos para la protección contra sobretensiones en sistemas de distribución es sin duda el método que más se ha desarrollado a la fecha. Se inició en Estados Unidos en 1897, cuando se patentó el primer pararrayos para la protección de transformadores en un voltaje de 1200 V, publicándose en 1928 la primera norma que contenía las principales características de estos dispositivos de protección. En 1912 se introdujo el primer pararrayos de cámara de compresión, en el que se conectó una resistencia en serie con varios discos de bronce separados por roldanas de porcelana que permitían limitar la corriente de frecuencia normal 50 ó 60 Hz, que sucedía a las corrientes transitorias. Durante una descarga los gases generados por el arco se comprimían, ayudando de esta manera a extinguirlo.

En 1953 se introdujo el primer pararrayos que operaba con principio magnético; este pararrayos permitió el uso de elementos de menor resistencia. El pararrayos tenía un peso de casi la mitad que uno de esferas de similar tensión y capacidad de descarga. La principal característica de este pararrayos es su resistencia no lineal; se fabrica con una mezcla de silicio y arcilla calentada y compactada a más de 1200°C de temperatura.

En 1971 la compañía General Electric de Estados Unidos lanzó al mercado un nuevo tipo de pararrayos con mejores características eléctricas, que lo hacían más adecuado para proteger las instalaciones de distribución. Consta de un elemento resistivo no lineal similar

al anterior y un conjunto de entrehierros diseñados de tal manera que la tensión de chispeo del pararrayos es menor que en los otros tipos y la corriente de 60 ciclos se extingue por acción magnética (Espinosa 2005).

Finalmente, en la década de los setentas la industria eléctrica japonesa desarrolló los primeros pararrayos sin entrehierro, conocidos como pararrayos de óxido de zinc (ZnO).

Pararrayos de óxido metálico (ZnO) y carburo de silicio (SiC).

El sector eléctrico ha visto cambios en el diseño de los pararrayos en los últimos años. Mientras muchos diseños más viejos pueden aun encontrarse en sistemas de distribución, la gran mayoría de los pararrayos de ahora son de:

- Carburo de silicio con explosores.
- Varistores de óxido metálico (MOV por sus siglas en ingles Metal Oxide Varistor).

La principal característica de los pararrayos de óxido metálico (ZnO) es que ellos operan sin la necesidad de emplear entrehierros tal como se muestra en la Figura 1.3. En ellos la cámara aislante de porcelana, o de algún compuesto polimérico, cumple las mismas funciones que en el pararrayos de carburo de silicio.

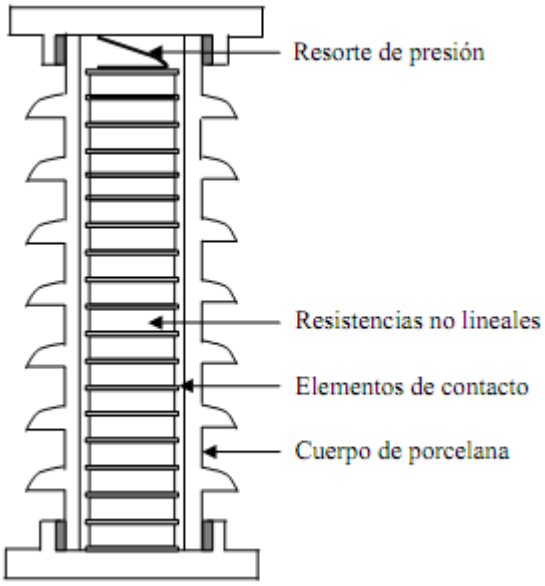


Figura 1.3 Características generales de un pararrayos de ZnO.
Fuente: (Almirall 2004)

Las resistencias no lineales son discos cerámicos densos compuestos en un 85-90 % de ZnO y en un 10-15 % de otros óxidos metálicos como son: Bi_2O_3, $Sb2O_3$, CaO, MnO_2, CrO_3, NiO, $Al(NO_3)_3$.

La representación logarítmica de la característica de tensión contra corriente se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**. En la región 1 la tensión aplicada se distribuye en las capas intergranulares, las que pueden soportar hasta 2,5 V para densidades de corriente en la resistencia de 10-4A/cm^2. En esta región la corriente que circula es capacitiva y la resistiva que circula está limitada a la motivada por aquellos electrones de muy alta energía térmica que son capaces de vencer la barrera de potencial de las capas intergranulares.

La región 1 corresponde a la región de explotación bajo condiciones de tensión nominal del pararrayos, en ella la corriente resistiva que circula es por lo general menor de 1 mA y la misma juega un papel muy importante en la estabilidad térmica del pararrayos, ya que como se puede ver en la Figura 1.4la misma varía con la temperatura del resistor. Cuando la tensión aumenta y se alcanza la región 2, el campo eléctrico ya es capaz de dar a los electrones la energía necesaria para que comiencen a vencer la barrera de potencial,

adquiriendo en esta región la capa intergranular su carácter dinámico: se comporta como una resistencia que disminuye su valor al aumentar la tensión. Esta región se caracteriza por una alta alinealidad.

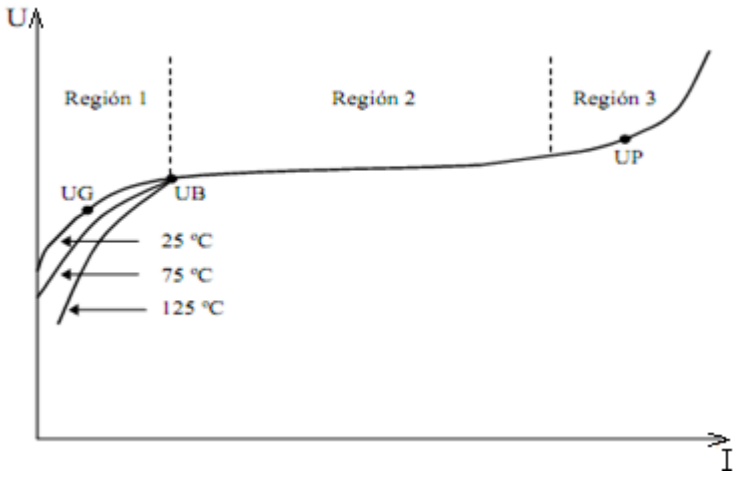


Figura 1.4 Característica logarítmica de tensión contra corriente (U & I) de los descargadores de ZnO.
Fuente:(Espinosa 2005)

En la región 3 se alcanza el máximo debilitamiento de la barrera de potencial y la caída de tensión en el resistor está determinada por la caída en los granos de ZnO, siendo éstos por tanto quienes determinan la tensión residual del pararrayos. Disminuyendo la resistividad de los granos de ZnO mediante su dopado se puede disminuir la tensión residual, pero esto siempre trae como consecuencia un aumento en la corriente resistiva bajo condiciones de operación nominales con un aumento de las pérdidas y por tanto con un empeoramiento en el comportamiento térmico del resistor. Las pérdidas de energía en forma de calor y por lo tanto su estabilidad térmica son quienes limitan la tensión de operación máxima permisible de este tipo de pararrayos (Almirall 2004).

En la Tabla 1.1 se resumen las principales características de los pararrayos de ZnO comparados con los de SiC. En forma general pueden resumirse a continuación las ventajas que estos dispositivos tienen con respecto a los del tipo autovalvular (Espinosa 2005).

- Mejoran los márgenes de protección.
- Mayor capacidad térmica.

- Construcción más sencilla al no tener entrehierros.
- Tamaño y peso reducido.
- Mejor comportamiento en zonas contaminadas.

Tabla 1.1 Comparación entre los pararrayos de ZnO y SiC.

Carburo de Silicio	Óxido de Zinc
Requiere entrehierros	No requiere entrehierros
Debe llegar a una tensión de chispeo para descargar la energía debida a una sobretensión.	Al no tener entrehierros conduce la corriente de descarga de forma inmediata después que se presenta una sobretensión.
Bajo condiciones normales de operación es insensible al medio ambiente.	Es relativamente insensible al medio ambiente; sin embargo, es muy sensible a la temperatura, siendo esta por tanto una variable muy importante en su diseño.

Existen tres clases de pararrayos: Distribución, Intermedio y Estación. Para la mayoría, las principales diferencias de estos tipos de pararrayos es el tamaño del bloque. Un bloque más grande reduce la tensión de descarga IR e incrementa bastante la capacidad de energía y su confiabilidad. Las 3 clases de pararrayos están disponibles para las redes de distribución como se muestra en la Tabla 1.2 Los pararrayos del tipo distribución son usados en los alimentadores mientras que el intermedio y el tipo estación son usados en las subestaciones eléctricas.

Tabla 1.2 Tensiones nominales para las clases de pararrayos

Voltajes nominales en kV																	
Distribución	1	3	6	9	10	12	15	18	21	25	27	30					
Intermedios Estación	3	6	9	12	15	21	24	30	36	39	48	60	72	90	96	108	120

1.4.2.1 Selección de pararrayos.

La selección de la tensión de un pararrayos para un sistema de distribución está basada en el voltaje línea – tierra y en la forma como está aterrizado el sistema. La condición limitante para un pararrayo no tiene nada que ver con la magnitud de la descarga (de suicheo o de rayo) que puede ser contrastante con la selección de pararrayos para transmisión. En distribución, el voltaje nominal del pararrayo está basado en la tensión máximo línea – tierra de estado estable que el pararrayos puede ver. Esta condición limitante es causada cuando existe una falla línea a tierra en una de las otras fases.

De acuerdo con la norma (Ansic62.22 1999), “Guía para la aplicación de pararrayos de óxido metálico para sistemas de corriente alterna”, la aplicación de pararrayos en sistemas de distribución requiere del conocimiento de:

- Tensión máxima de operación continua del sistema de potencia (MCOV por sus siglas en ingles Maximum Continuos Over Voltage).
- La magnitud y duración de las sobretensiones temporales (TOV por sus siglas en ingles Temporal Over Voltage), durante condiciones anormales de operación.

1.4.2.2 Tensión máxima de operación continúa (MCOV).

La tensión máxima de operación continua (MCOV) es un término que ha sido difícil de determinar para muchas empresas de energía. En un sistema de distribución donde la tensión es siempre cambiante debido a la variación de las demanda de las cargas, y donde la tensión en una parte del sistema puede ser diferente al de otras partes (por ejemplo cerca de la subestación eléctrica y al final del alimentador), en algunas ocasiones es imposible definir solo un valor de MCOV.

El MCOV de un pararrayos se considera de forma aproximada el 84 % la tensión nominal del pararrayos de ciclo de trabajo nominal como se muestra en la Figura 1.5.

Para la selección de pararrayos en sistemas aislados con conexión en (DELTA) o puestos a tierra por alta impedancia, con condiciones de falla a tierra removida dentro de 30 minutos se aplica teniendo en cuenta la ecuación (1.1).

$$MCOV = \frac{TensiónMáxima_{l-l}}{1,234} \qquad (1.1)$$

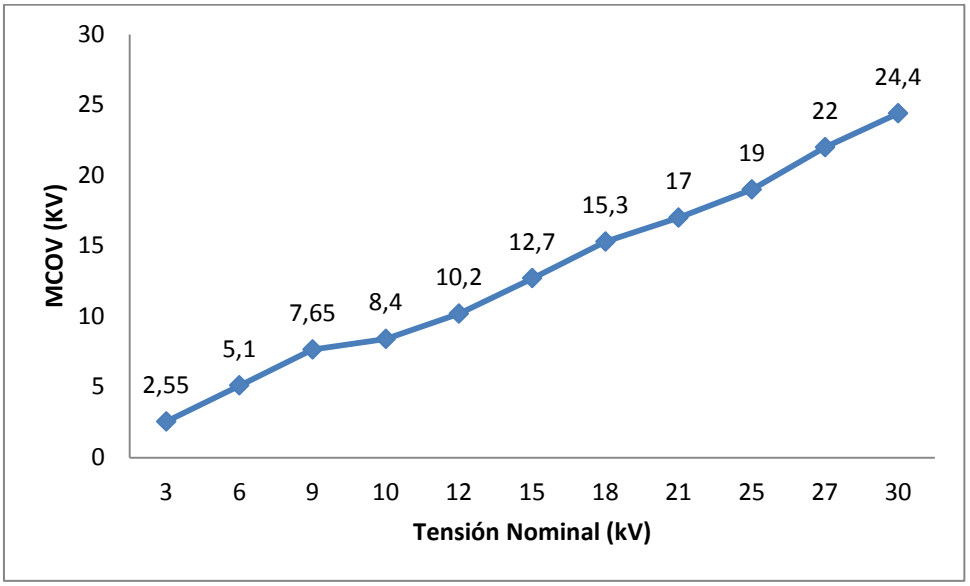


Figura 1.5 Tensión nominal de pararrayos vs MCOV.

Sobretensión temporal (TOV).

Este factor depende fundamentalmente de los valores que se alcanzarán en las dos fases no falladas cuando existe una falla a tierra en la tercera.

La cantidad de tensión que aparecerá es una función del tipo de puesta a tierra del sistema. Por ejemplo, en un sistema en conexión Delta una falla línea – tierra causará una compensación total. Por ejemplo, la tensión línea - tierra llegará a ser la tensión línea - línea.

Las tensiones nominales de pararrayos con descargadores seleccionados para un sistema con neutro multiaterrizado y con conductores desnudos es igual o mayor a la tensión nominal línea tierra multiplicado por el producto del factor de regulación 1,05 y el factor de

elevación de la tensión 1,20. Esto es equivalente a 1.25 veces la tensión nominal línea tierra del sistema (ver ecuación (1.2)).

$$V_{np} = V_{n'L-T} \cdot 1,05 \cdot 1,20 \qquad (1.2)$$

Donde:

Vnp: tensión nominal de pararrayo (V).

Vn'L-T: tensión nominal línea a tierra (V)

Para un pararrayos tipo MOV esta tensión es comparado con el TOV nominal del MOV. Puesto que el pararrayos MOV es más sensible a tierras pobres, a la regulación mala y a la reducida saturación algunas veces encontradas en los nuevos transformadores, se recomienda generalmente un factor de 1.35 para pararrayo tipo MOV (Almirall 2004).

1.5 Sobretensiones externas

Las sobretensiones externas son de origen atmosférico y toman mayoritariamente la forma de un impulso unidireccional; la amplitud máxima posible de la onda no tiene ninguna relación con el voltaje de operación del sistema. Estas sobretensiones se deben a:

- Las descargas atmosféricas directas.
- Tensiones inducidas por descargas atmosféricas a tierra que ocurren cerca de la línea.
- Sobretensiones inducidas electrostáticamente por nubes cargadas eléctricamente.
- Sobretensiones inducidas causadas por fricciones entre pequeñas partículas de polvo existentes en la atmósfera.

De todas estas variantes las que tienen mayor probabilidad de ocurrir y causan mayor daño son las descargas atmosféricas directas y voltajes inducidos por descargas atmosféricas a tierra que ocurren cerca de la línea.

La descarga de un rayo resulta, en la generación de enormes sobretensiones que depende de la forma en que se manifieste la agresión de la descarga, produciendo un menor o mayor daño. Esta descarga puede causar incendios, destrucción de maquinaria e incluso muertes de personas (Hermoso 1998; Espinosa 2005).

1.5.1 Descargas atmosféricas directas e indirectas

Las descargas atmosféricas directas ocurren cuando las descargas caen directamente en la línea, recibiendo bruscamente una tensión muy elevada que puede provocar descargas a tierra a través de los postes o del cable de guarda, según sea el elemento de protección utilizado.

Si un rayo impacta sobre una línea aérea, de manera directa sobre los conductores de fase, los hilos de guarda o sobre las torres se originan ondas de sobretensiones en ambas direcciones, a partir del punto de impacto.

Las descargas indirectas son aquellas que no impactan directamente en la línea, pero que retornan por un canal ionizado cercano a la línea, dentro de un radio de acción de aproximadamente 200 m. El cambio brusco del campo electromagnético producido por la circulación de la corriente de retorno induce en la línea una sobretensión ver (Batista 2011).

1.5.2 Parámetros de las descargas eléctricas

Los diferentes estudios y pruebas de campo permiten conocer algunos datos acerca del rayo como son:

La temperatura máxima de un rayo puede alcanzar valores aproximados a 30.000 ºC,
Duración aproximada de una millonésima de segundo.
El diámetro de la descarga visible del rayo (canal ionizado) es del orden de 1,5 cm.
La longitud de la descarga vertical es normalmente de 5 a 7 km.
El valor pico de corriente puede llegar a ser de 300 kA.
El valor de la tensión entre la nube y la tierra, antes de la descarga puede llegar a ser de 300 a 1000 millones de voltios, según (Iie 2008).

1.5.3 Corrientes eléctricas descargadas por un rayo

Las corrientes que circulan durante las sucesivas descargas de retorno de un rayo, son muy intensas, tienen corta duración y su forma de onda muestra un crecimiento empinado

hasta alcanzar su pico máximo, seguido de un decrecimiento más lento. En los rayos con múltiples descargas, la primera es la que drena la mayor corriente, siendo las siguientes de menor intensidad. Las descargas siguientes tienen un pico aproximado de la mitad de los valores de la primera. El pulso de corriente de una descarga tiene un rápido crecimiento inicial y en un tiempo de unos pocos microsegundos llega a su máximo, luego comienza a decrecer, y pasados 120 microsegundos transcurridos desde su inicio, la descarga cesa.

Los valores característicos de las magnitudes relacionado con un rayo según (Rodríguez 2006) aparecen en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3 Magnitudes características del rayo.

Tensión entre nube y un objeto a tierra	1, a 1,000, kV.
Intensidades de descarga	5 a 300 KA.
di/dt	7,5kA/s a 500kA/s.
Frecuencia	1 K Hz a 1 M Hz
Temperatura superior a	27,000 grados Centígrados.
Propagación	340 metros por segundo.
Campo electroestático por metro de elevación sobre la superficie de la tierra	10 kV

La magnitud de la corriente eléctrica producida por las descargas atmosféricas varía inversamente con el número de descarga en la figura (Figura 1.6) se muestra el ejemplo para las mediciones realizadas en los últimos cinco años.

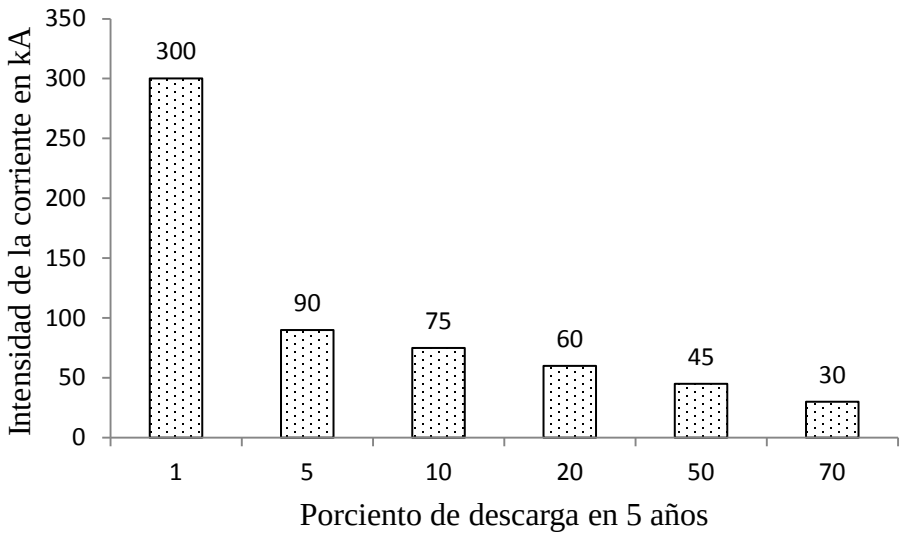


Figura 1.6. Magnitud de la corriente de descargas atmosféricas en los últimos cinco años.

Si bien la energía disipada no es mucha, la potencia desarrollada en una descarga eléctrica atmosférica es muy grande, pues su elevada corriente se libera en muy corto tiempo. También las sobretensiones son elevadísimas, pues sólo se interpone en su camino valores pequeños de impedancia, para corrientes en el orden de los kA.

1.5.4 Normas existentes para normalizar la onda de tensión

Con el objetivo de verificar en laboratorios el comportamiento de los aislantes frente a los diferentes tipos de sobretensiones, se han establecido las formas de ondas normalizadas por ejemplo la norma UNE-EN 60071-1 (Mockey 2002; Hasse 2002; Ramírez 2009), aplicada a sistemas en donde la característica fundamentales son:

- Impulso de tensión tipo maniobra normalizado: es un impulso de tensión con un tiempo de subida hasta el valor de cresta de 250 µs y un tiempo de cola de 2,500 µs.
- Tensión normalizada de corta duración a frecuencia industrial: es una tensión sinusoidal, de frecuencia comprendida entre 48 y 62 Hz, y una duración igual a 60 segundos.
- Impulso de tensión tipo rayo normalizado: es un impulso de tensión con un tiempo de subida hasta el valor de cresta de 1,2 µs y un tiempo de cola de 50 µs (forma de onda que se utilizó para crea el modelo de la descarga eléctrica, ver Figura 1.7).

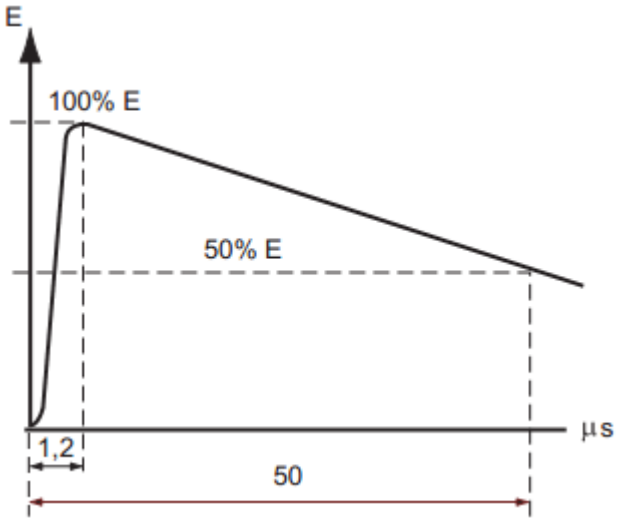


Figura 1.7 Onda normalizada de 1.2 x 50 µseg.
Fuente: (norma UNE-EN 60071-1)

- Impulso de tensión tipo maniobra combinado normalizado: es un impulso de tensión combinado que tiene dos componentes del mismo valor de cresta y polaridad opuesta, la componente positiva es un impulso de maniobra normalizado, mientras que la componente negativa es un impulso de maniobra cuyos tiempos de subida y de cola no deberían ser inferiores a los del impulso positivo. Ambos impulsos deberían alcanzar el valor de cresta en el mismo instante. El valor de cresta de la tensión combinada es, por tanto, la suma de los valores de cresta de los componentes.
- En cuba se utiliza la NC-960209 de 1987, Protección contra descargas eléctricas atmosféricas.

Para establecer una relación entre las sobretensiones reales y las formas de onda normalizadas se definen sobretensiones representativas. Por ejemplo para sobretensiones que se supone producen el mismo efecto sobre el aislamiento que las sobretensiones de una determinada clase que aparecen en servicio, tienen la forma de onda normalizada de la clase correspondiente y pueden estar definidas por un valor, un conjunto de valores o una distribución estadística de valores (Ramírez 2009).

La incidencia de rayos sobre un conductor de fase puede darse por ausencia o deficiencia en el blindaje de la línea. Si el rayo cae sobre un conductor de fase se originan dos ondas de corriente que viajan en dirección opuesta y de valor igual a la mitad de la corriente del

rayo (I/2), esta corriente produce dos ondas de tensión cuya amplitud es función de la impedancia característica de la línea y se calcula por la ecuación (1.3).

$$V_{cond} = \frac{I}{2} \cdot Zc \quad (1.3)$$

Donde:

V_{cond} : Amplitud de la onda de tensión en las líneas en V

Zc : impedancia característica de la línea en ohm

1.6 Clasificación de los sistemas según la conexión a tierra del neutro

De acuerdo con la conexión a tierra del neutro del sistema y de las sobretensiones que se originan en el caso de una falla de fase a tierra, los circuitos de distribución se pueden clasificar de acuerdo a la Tabla 1.4.

Tabla 1.4 Clasificación de los sistemas eléctricos de acuerdo al tipo de aterramiento.

Clase	Descripción	X_0/X_1	R_0/X_1	Coeficiente de aterrizamiento (KA)
A	Aterrizado	----	----	0,75
B	Aterrizado	<3	<1	0,80
C	Aterrizado	3 a ∞	1 a ∞	1,00 - 1,5
D	No aterrizado	-40 a -∞	----	1,10 – 2,03
E	No aterrizado	0 a -40	----	----

X_0: reactancia de secuencia cero en Ω

R_0: resistencia de secuencia cero en Ω

X_1: reactancia de secuencia positiva en Ω

Los sistemas clase **A** son aquellos cuyos neutros están conectados a tierra, con relaciones de reactancias menores que las de los sistemas clase **B**. Estos sistemas son trifásicos de cuatro hilos, multiaterrizados a lo largo del circuito; en ellos las tensiones nominales de los pararrayos pueden ser menores y más cercanas a las tensiones de línea a neutro que las que se recomiendan para otros sistemas.

Los sistemas clase **B** son aquellos para los que la relación X_0/X_1 es positiva y menor que tres, y la relación R_0/X_1 es menor que uno en cualquier punto del sistema. Estos límites designan un sistema efectivamente aterrizado.

Los sistemas clase **C** son aquellos cuyos neutros están aterrados pero sus características no llenan los requisitos de los clase B, bien sea que la relación de las reactancias X_0/ X_1 exceda de tres o la relación R_0/X_1 exceda de uno, o ambas. Estos sistemas generalmente están conectados a tierra mediante alguna resistencia o reactancia, los sistemas que emplean neutralizadores de fallas o bobinas de Petersen se incluyen en esta clase.

Los sistemas clase **D** son sistemas de neutro aislado, en que la reactancia de secuencia cero es capacitiva; la relación de reactancias X_0/X_1, queda entre -40 y -∞.

Los sistemas clase E son los de neutro aislado, que no satisfacen los límites de los sistemas tipo **D**. Se caracterizan por altas corrientes de carga o por muy altas reactancias de secuencia positiva. La relación X_0/X_1 está entre 0 y -40. Para estos sistemas cada caso se debe tratar de acuerdo con sus propias características ver (Espinosa 2005).

Según la clasificación anterior la línea en estudio es un sistema clase E.

1.6.1 Sistemas modernos de protección contra descargas atmosféricas

1.6.1.1 Sistema de Arreglo de Disipación (DAS).

El Sistema de Arreglo de Disipación (DAS) ha sido diseñado para prevenir un rayo, para proteger al área considerada y al propio sistema. Los componentes del Sistema de Arreglo de Disipación son: el DAS Ionizador, el sistema desviador Spline Ball, y el CHEM-ROD o Electrodo de Tierra (Zipse 2002; Www.Lecmex.Com. 2005).

El Sistema de Arreglo de Disipación, se basa en el fenómeno de la descarga de punta como un mecanismo de transferencia de carga del área protegida al área de la atmósfera que le rodea. El campo electrostático creado por la célula de tormenta, alejará esa carga del área protegida, dejando en el lugar un potencial más bajo que en sus alrededores ver Figura 1.8.

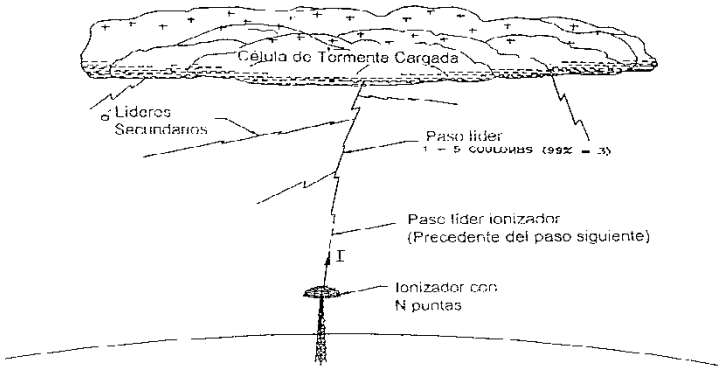


Figura 1.8 La Punta de Descarga como un Mecanismo de Transferencia.
Fuente: (Hasse 2002)

Un fenómeno secundario que se suma a la protección provista por el DAS, es la presencia de la “carga espacio”. Esta carga se desarrolla entre el área protegida y la célula de tormenta y forma lo que se puede considerar un blindaje (una Jaula de Faraday). Las moléculas de aire ionizadas formadas por la punta de descarga, son disipadas por el ionizador a la atmósfera donde se acumulan lentamente, formando una nube de moléculas de aire ionizado (Plasma de Iones) (Ver Figura 1.9).

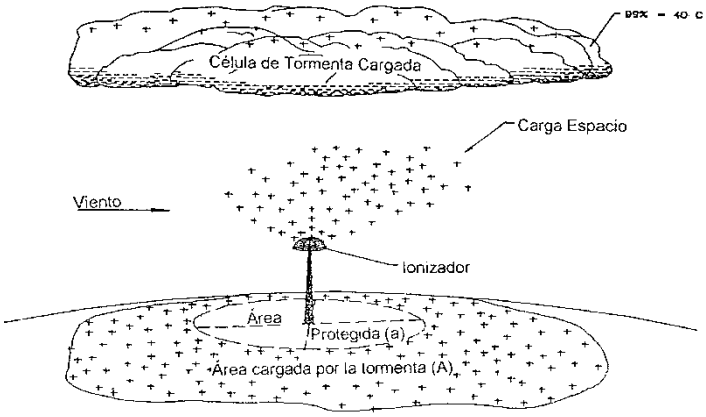


Figura 1.9 Efecto Carga Espacio
Fuente: (Hasse 2002)

1.6.1.2 Ionizador DAS

El Ionizador DAS, es un dispositivo multipuntas para producir iones a través de miles de puntas simultáneas. Como el campo electrostático se está incrementando, una sola punta creará flámulas y provocará un rayo. En contraste, el Ionizador multipuntas iniciará el proceso de ionización a algún potencial alto, pero como el potencial está en aumento, la corriente de ionización se incrementa de manera exponencial. Como estos iones son dispersados en una gran área, no se generarán flámulas. En situaciones extremas, se produce una nube luminosa de iones, produciendo un halo luminoso momentáneo, alrededor del arreglo de disipación, desencadenando un flujo de corriente (Zipse 2002).

1.6.1.3 El Sistema desviador Spline Ball (SBDS).

En el mercado actual se pueden encontrar ionizadores híbridos, los cuales combinan las características del ionizador con los del terminal aéreo. Esto ha llevado al desarrollo de dos productos:

- El Módulo Spline Ball Terminal (SBT)
- El Módulo Spline Ball Ionizer (SBI)

Estas dos unidades, están certificadas como “Terminales aéreos” y ambas califican como módulos ionizadores. Las puntas múltiples hacen de ellos un ionizador. El espaciamiento

adecuado entre puntas, asegura una corriente de ionización óptima antes de que actúen como “colectores”. Al estar calificados como “Terminales aéreos”, también pueden usarse en cualquier sistema con esta función. Ambos dispositivos tienen más de 100 puntas cada uno, los cuales cuando se despliegan, presentan puntas en todas direcciones a 360º en azimut y aproximadamente a 200º en elevación. Como resultado, independientemente de la orientación del campo eléctrico relacionado con la tormenta o con un paso líder descendente, muchas puntas ionizadoras estarán orientadas directamente hacia él y listas para transferir la carga rápidamente.

Estas formas de módulos ionizadores soportan una gran variedad de aplicaciones. Cuando se usan estos módulos en la cantidad adecuada para reemplazar a los terminales de aire (pararrayos convencionales), los módulos SBI y SBT (ver Figura 1.11), convierten a un Sistema Colector Convencional, en un sistema preventor.

1.6.1.4 Electrodo de Tierra CHEM-ROD

El Electrodo de Tierra CHEM-ROD (ver Figura 1.10), de LEC, tiene una bajísima impedancia de surge, lo cual da como resultado, una gran eficiencia en el Sistema de Tierras. Provee baja resistencia de conexión con la tierra física, por medio de un acondicionamiento continuo del terreno que le circunda, usando un compuesto de sales minerales de muy baja resistividad, a lo largo de todo el electrodo, altamente osmóticas y no contaminantes, llamadas GAF. Es tan eficiente, que un solo electrodo CHEM-ROD puede reemplazar a más de 10 varillas de tierra convencionales. El diseño del CHEM-ROD, asegura una estabilidad y eficiencia en el Sistema que virtualmente requiere mantenimiento cada año, y su tiempo de vida rebasa los 20 años.

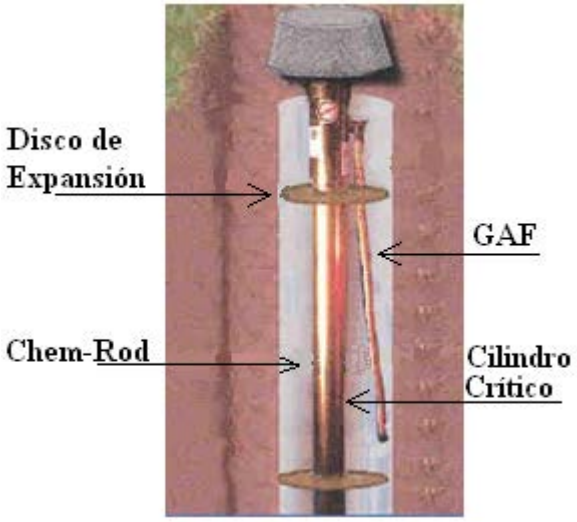


Figura 1.10 Instalación de un Chem-Rod con el sistema disco de expansión.
Fuente: (Hasse 2002)

El CHEMROD favorece la reducción de la resistencia a menos del 4 % de la que ofrece una varilla convencional equivalente en longitud (3/4" de diámetro y 10' de longitud), y una importante reducción en la impedancia de surge, menos del 5 % de la de una varilla convencional. Además, el uso del Relleno Acondicionador de Tierra (GAF) puede representar importante reducción en la resistencia y la impedancia de surge a tierra (Eriksson 1987; Carpenter 2008).

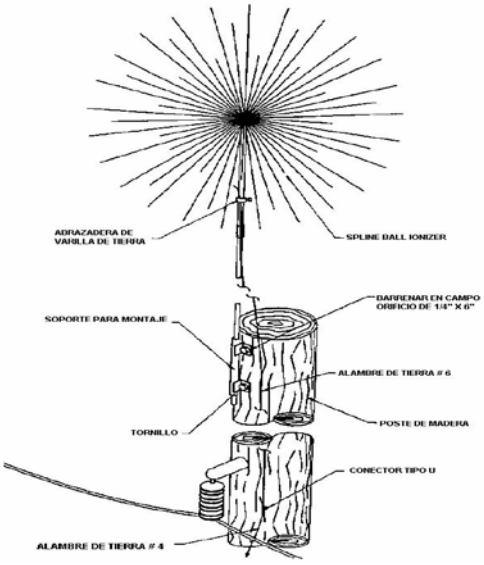


Figura 1.11 Instalación de un SBI en un poste de una línea de distribución.
fuente: (Hasse 2002)

1.6.1.5 El Sistema Disipador Dual (DDS)

El DDS, está basado principalmente en el DAS, el cual a su vez se basa en el principio del fenómeno de Electrostática conocido como “Punta de Descarga”. Este es un método de descarga en un área de la superficie de la tierra, durante el paso de una nube de tormenta sobre esa área. Descargando la carga inducida, se obtiene como resultado una reducción de la tensión inducida en ese sistema y en el campo electrostático que está presente entre el Sistema y la Célula de Tormenta (Nube de Tormenta).

Estos campos eléctricos normalmente alcanzan niveles de entre 10 kV y 30 kV por metro de elevación sobre el nivel de la tierra y la célula de tormenta durante una tormenta madura. El DDS, reduce ese campo eléctrico a menos de una décima del valor normal dentro de su esfera de influencia (Grzybowski 1992).

Disminuyendo el campo eléctrico alrededor de las líneas protegidas, se logran dos objetivos importantes:

- La tensión en el DDS y en los conductores de fase es disminuido significativamente, de tal manera que no se podrán convertir en un receptor de una descarga de rayo directa. Las instalaciones que se encuentren alrededor de las líneas protegidas por el DDS, no sufrirán afectaciones si no están fuera del área de la esfera de influencia del DDS.
- Las tensiones transitorios en los conductores de fase que son inducidos normalmente por las elevaciones y caídas del campo eléctrico circundante, estas suelen ser la causa del flameo, aún en las líneas de distribución de baja tensión.

A pesar que este tipo de protección según la literatura es de un 99.7 % de eficiencia y que algunos autores como (Carpenter & Drabkin 2003) declaren al (DAS) como el único sistema de prevención de rayos confiable, estos dispositivos no son totalmente aceptados por la comunidad internacional (Torres 2002; Molina 2002), a pesar de estar fundamentados en principios científicos, los argumentos técnicos han sido muy cuestionados. Además, otros estudios (Rison 2004) sobre estas protecciones realizados por importantes centros científicos como la NASA a raíz de la necesidad de instalar

protecciones contra descargas atmosféricas en las ranflas de lanzamientos de cohetes espaciales, han demostrado matemáticamente que es imposible que los DAS inyecten al espacio la cantidad de cargas suficiente en un determinado tiempo para crear un escudo entre el área protegida y las nubes cargadas, de forma que reduzca el campo eléctrico nube tierra con el fin de inhibir la formación del líder descendente desde la nube y el líder ascendente desde la estructura que se quiere proteger. Estos elementos sumados a hecho de que las descargas atmosféricas pueden tener diferentes polaridades atentan contra la propaganda de los productores de esta tecnología, las críticas positivas del mercado podrían estar fundamentadas en que los dispositivos de aterramiento activos como el Chem-Rod son sumamente efecticos y permiten obtener niveles de aterramiento muy bajos, por lo que los dispositivos DAS no serían un sistema preventivo sino un eficiente sistema colector convencional, pruebas de esto se pueden encontrar en (Kuwabara *et al.* 2000) donde se exponen los resultados de un estudio en dos torres de telecomunicaciones antes y después de la instalación del DAS, demostrándose que en los mismos meses de años diferentes (antes y después de la instalación) la cantidad de tormentas que incidieron las torres son similares, sin embargo la salida de servicio fueron mínimas.

La discusión planteada sobre la validez de estas tecnologías pareciera estar viciada y manipulada por intereses comerciales (Silva 2003). Es por ello que ninguna norma internacional de protección contra rayos (IEC 61024 (Internacional), ANSI / NFPA 780-1992 USA, Canada), BS 6651-1992 (Gran Bretaña), NTC-4552 – 1999 (Colombia), DIN 57185/VDE 0185-1983 (Alemania), CEI 81-1 – 1990 (Italia), UTE C15-531- 1986 (Francia), AS 1768-1991 (Australia)) avala, hasta el día de hoy, el sistema DAS. Independientemente de que muchos de los miembros de sus comités técnicos representan los intereses de compañías que comercializan alguna de estas tecnologías.

1.7 Conclusiones Capítulo 1

- El estudio bibliográfico permitió identificar al método de “la tensión continua de operación (MCOV) comparado con la magnitud y duración de las sobretensiones

temporales (TOV)" como óptimo para la selección de pararrayos valvulares en sistemas con neutro aislado.

- Se clasificaron las sobretensiones en dependencia de la conexión a tierra del neutro, concluyendo que la línea de la mina Yagrumaje es un sistema clases **E**.
- El análisis de las principales protecciones contra las descargas eléctricas en líneas aéreas demostró como el uso del hilo de guarda y el sistema de arreglo de disipación son métodos poco eficientes.

CAPÍTULO 2. SIMULACIÓN DE SOBRETENSIONES EN LA LÍNEA ANTE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

2.1 Introducción

Las descargas atmosféricas provocan sobretensiones en las líneas de transmisión y distribución, que son transitorios de muy corta duración. Las sobretensiones por descargas indirectas no se consideran de gran relevancia para sistemas de más de 67 kV, no obstante, para los sistemas de menor tensión, sí deben considerarse como perjudiciales y deben ser protegidos con diversos dispositivos. Es un hecho que las descargas directas afectan los sistemas de baja, media y alta tensión.

El equipo protector ideal debe derivar toda la intensidad máxima (Imax) generada por la sobretensión y que en sus extremos la tensión residual (Ures) sea menor que la soportada por la línea a proteger.

Conseguir alto poder de descarga y bajo valor de tensión residual en un mismo pararrayo es irrealizable, por lo que la utilización de un único equipo de protección no asegura la protección de toda la instalación. Para ello se deben colocar dos o más de forma coordinada, por lo que este capítulo se dedica a la simulación del sistema en presencia de sobretensiones para determinar de forma técnica y económica la variante a utilizar.

El objetivo del presente capítulo consiste en la caracterización del sistema eléctrico y la definición de las características topológicas de la línea para la simulación ante las descargas eléctricas.

2.2 Caracterización de la red eléctrica de la mina Yagrumaje en la Empresa Ernesto Che Guevara

La línea aérea Yagrumaje está compuesta por tres conductores del tipo LA-78 mm que suministran una tensión de 6,3 kV, estos cables están sustentados en aisladores de tipo pedestal de porcelana y aisladores suspensión de cristal que van ubicados en crucetas tipo galvanizadas de 100x2400 mm (ancho x largo).

El actual sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea está constituido por un cable de guarda con las siguientes características, conductor tipo AL-35 mm, va adosado a la viga mediante un electrodo o pica de tierra de acero galvanizado de 1,5 m de profundidad y 23 mm de diámetro

Al principio de su puesta en explotación, en el año 1986 la línea aéreas solo alcanzaban entre 600 y 1000 metros de longitud y su altitud sobre el nivel del mar no superaba los 45 metros, hoy día estas líneas poseen otra configuración con una longitud mayor de 3 km con una altura entre 68-185 m.

2.2.1 Esquema de alimentación de la línea aérea

La línea aérea de la mina Yagrumaje se energiza del armario número seis de la subestación 2SD. Esta misma barra alimenta otras cargas, por ejemplo, los exhauster de la planta de secado, motores de 6 kV y de 630 kW que figuran dentro de los equipos que más se averían por descargas atmosféricas junto a los motores sincrónicos de las excavadoras de la mina de 6 kV y 500 kW. Estos equipos son alimentados de la misma subestación eléctrica y guardan relación eléctrica y esquemática a pesar de estar físicamente separados (ver. Figura 2.1).

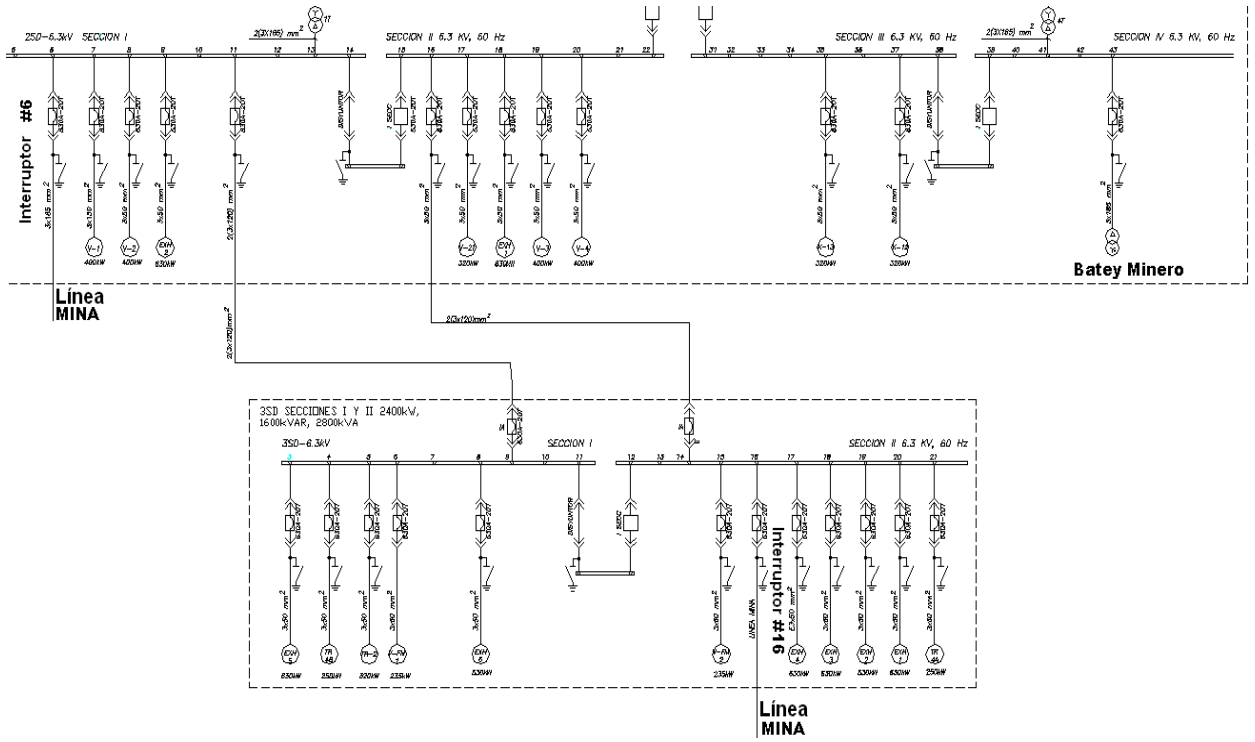


Figura 2.1. Esquema unifilar de las subestaciones 2SD y 3SD.

2.2.2 Levantamiento topográfico de la línea

Uno de los principales elementos que atentaba contra el desarrollo de proyectos y estudios en esta línea es el hecho de que no existe un levantamiento topográfico que permita conocer la distancia exacta y las condiciones actuales de los diferentes ramales que componen la línea de la mina. La revisión de trabajos anteriores, los datos obtenidos del grupo de topografía de la UEB minera y la Empresa CEPRONIQUEL mostraron que solamente se tienen pequeñas trazas del recorrido de la línea y algunas de estas, son trayectos que hoy ya no existen, por lo que fue necesario realizar un levantamiento topográfico para obtener el trazado exacto y las condiciones reales de la línea.

Para realizar el levantamiento del trazado de la línea se utilizó el GPS LEICA GS20 PDM dispositivo que permite realizar mediciones de los tres ejes de coordenadas con una apreciable exactitud tanto en estado estacionario como en estado dinámico.

Las mediciones realizadas permitieron determinar que la línea tiene 3138,3 m de cable tendido sobre el terreno, 5335,2 m de cable aéreo y 1800 m de estacadas dentro de la fábrica.

2.2.3 Sistema actual de protecciones contra descargas atmosféricas de la línea

En la actualidad para la protección contra sobretensiones atmosféricas son conectados entre cada fase y tierra descargadores valvulares, colocados preferentemente al principio y en el interior de las SKID.

La selección del nivel de tensión nominal de estos es correcta (9 kV), sin embargo no así su aterramiento ya que en algunos casos es nulo o se reduce a enterrar un electrodo en el terreno.

Una muestra del mal funcionamiento del esquema de estas protecciones es que los motores sincrónicos de las excavadoras acumulan una gran cantidad de afectaciones por las incidencias directas o indirectas de descargas eléctricas, entre las que destacan fallas en el aislamiento y de los devanados y los cables de conexión.

También se ha comprobado que algunos de los motores conectados a las secciones de barra de las subestaciones 2SD Y 3SD, en las cuales se encuentran conectadas las líneas aéreas de la mina, han sufrido envejecimiento prematuro o perforaciones de su aislamiento que han ocasionado serias afectaciones a la producción (Batista 2011).

Principales deficiencias encontradas en el levantamiento de la línea.

- La mayor parte de la línea aérea no cuenta con el hilo de guarda.
- Los tramos de línea que cuentan con cable de guarda en su mayoría no están aterrados.
- Ausencia de descargadores en algunos ramales de la línea.
- Cercanía de uno de los ramales con la línea de 110 kV que alimenta la fábrica (menos de 6 m).
- Empalmes realizados sobre el terreno con ausencia de registros u otro tipo de protección física

- Los tramos de línea sobre el terreno no cuentan con ningún tipo de señalización o señal de advertencia.
- Ausencia de mallas a tierra en las SKID que alimentan las excavadoras
- Ausencia de dispositivos de protección en los cuadros de mando de los motores sincrónicos de las excavadoras.
- Ausencia de dispositivos de captación y de aterramiento en el brazo de las excavadoras.
- Ausencia de supresores de tensión en los circuitos secundarios de las excavadoras.

2.3 Determinación de los parámetros eléctricos de la línea aérea de la mina Yagrumaje

La línea de la mina Yagrumaje, presenta un conductor de aluminio LA-78 mm^2 con una disposición asimétrica. Esta línea está traspuesta, por lo que las capacidades de cada fase con respecto a tierra, son diferentes en cada una de las posiciones que ocupa el conductor en el ciclo de transposición (Ricardo 2005).

En la Figura 2.2 se muestra su configuración y en ella se esquematiza las capacitancias distribuidas (C1) existentes a lo largo de la misma:

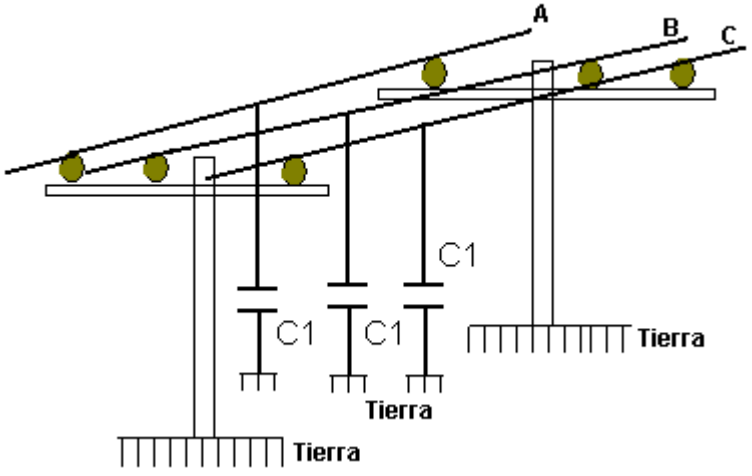


Figura 2.2 Disposición asimétrica de la línea de la mina

Para calcular las capacitancias de fase a tierra se debe tener presente el efecto que ejerce el suelo sobre la capacidad de las líneas ya que él modifica el campo eléctrico de la línea e incrementa su capacidad, Figura 2.3.

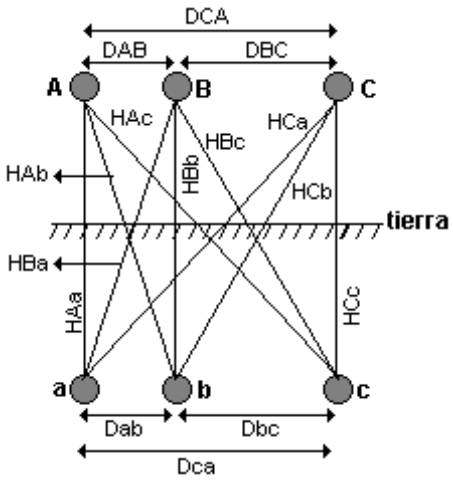


Figura 2.3 Línea trifásica y su imagen.

Utilizando el método de sustitución del suelo por la imagen de los conductores aéreos descrito en Grainger y Wilian (2001) se tiene que:

$$Cn = \frac{0,0241}{\log\left(\frac{Deq}{r}\right) - \log\left(\frac{\sqrt[3]{H_{Ab}\cdot H_{Bc}\cdot H_{Ca}}}{\sqrt[3]{H_{Aa}\cdot H_{Bb}\cdot H_{Cc}}}\right)} \quad \mu F / km \qquad (2.1)$$

$$Xc = \frac{10^6}{2\cdot\pi\cdot f\cdot Cn} \quad \Omega\cdot km \qquad (2.2)$$

Donde:

DAB: distancia entre el conductor de la fase A y la fase B.

DCA: distancia entre el conductor de la fase A y la fase C.

DBC: distancia entre el conductor de la fase B y la fase C.

HAa: distancia entre el conductor de la fase A y su imagen.

HBb: distancia entre el conductor de la fase B y su imagen.

HCc: distancia entre el conductor de la fase C y su imagen.

HAb: distancia entre el conductor de la fase A y la imagen del conductor de la fase B.

HAc: distancia entre el conductor de la fase A y la imagen del conductor de la fase C.

HBa: distancia entre el conductor de la fase B y la imagen del conductor de la fase A.

HBc: distancia entre el conductor de la fase B y la imagen del conductor de la fase C.

HCa: distancia entre el conductor de la fase C y la imagen del conductor de la fase A.

HCb: distancia entre el conductor de la fase C y la imagen del conductor de la fase B.

RMG: radio medio geométrico.

Con esta ecuación se podrá calcular las capacitancias distribuidas a lo largo de toda la línea. En dependencia de la configuración que tenga las crucetas de los postes, cambiarán las distancias entre los conductores. En el caso en estudio las distancias son:

DAB=60 cm, DBC=90 cm, DCA=150 cm

$$Deq = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{BC} \cdot D_{CA}} = \sqrt[3]{60cm \cdot 90cm \cdot 150cm} = 93,21cm = 0,93\ m \qquad (2.3)$$

Deq: distancia equivalente

Como el conductor de la mina (LA 78) tiene un diámetro exterior de 10.7 mm

$$r = \frac{diámetro}{2} = \frac{10,7mm}{2} = 5,35\ mm = 0,00535\ m \qquad (2.4)$$

Como los postes más numerosos en la línea son los de hormigón 10.70 metros, entonces

$$HAa = HBb = HCc = 10,7\ m$$

$$HAb = \sqrt{H_{Aa}{}^2 + D_{ab}{}^2} = \sqrt{(10,7m)^2 + (0,6m)^2} = 10,716\ m \qquad (2.5)$$

$$HBc = \sqrt{H_{Bb}{}^2 + D_{bc}{}^2} = \sqrt{(10,7m)^2 + (0,9m)^2} = 10,737\ m \qquad (2.6)$$

$$HCa = \sqrt{H_{Cc}{}^2 + D_{ca}{}^2} = \sqrt{(10.7m)^2 + (1.5m)^2} = 10.8\ m \qquad (2.7)$$

$$HCa = \sqrt{H_{Cc}{}^2 + D_{ca}{}^2} = \sqrt{(10.7m)^2 + (1.5m)^2} = 10.8\ m \tag{2.8}$$

$$Cn = \frac{0.0241}{\log\left(\frac{0.93}{0.00535}\right) - \log\left(\frac{\sqrt[3]{10.716 \cdot 10.737 \cdot 10.8}}{\sqrt[3]{10.7 \cdot 10.7 \cdot 10.7}}\right)} = 0.01\ \mu F / km. \tag{2.9}$$

$$Cn = \frac{0.0241}{\log\left(\frac{0.93}{0.00535}\right) - \log\left(\frac{\sqrt[3]{10.716 \cdot 10.737 \cdot 10.8}}{\sqrt[3]{10.7 \cdot 10.7 \cdot 10.7}}\right)} = 0.01\ \mu F / km. \tag{2.10}$$

La impedancia inductiva X_L es:

$$X_L = j0.00289 \cdot f \cdot \log\frac{\Delta eq}{RMG} \tag{2.11}$$

$$RMG = 0.7788 \cdot R_{ext} = 0.7788 \cdot 5.67 \cdot 10^{-3} = 0.004415\ \ m \tag{2.12}$$

$$X_L = j\,0.00289 \cdot 60 \cdot \log\left(211.1211\right) = j\,0.403 = 0.403\,\Omega / km \tag{2.13}$$

Utilizando el método de Wenner de cuatro polos (Mockey & Barrero 2002) se realizaron mediciones en diferentes puntos de la línea para determinar el valor de resistividad del terreno más significativo y a partir de este realizar los cálculos necesarios para diseñar las mallas de tierra para el aterramiento de los descargadores valvulares, teniendo en cuenta que la norma cubana establece que este valor no puede exceder los 10 Ω·m (Nc 1987; Almirall 2004; Torres 2011a).

Mediante el software SIAT para el cálculo de proyectos de aterramientos utilizando electrodos horizontales y verticales; seleccionando el valor de resistividad del terreno 100 Ω·m, por ser el más extremo de los medidos, se determinó que utilizando 2 electrodos verticales unidos por conductores horizontales se puede obtener una resistencia total de la malla a tierra de 7,9 Ω·m.

Tabla 2.1 Mediciones de resistividad del terreno

Mediciones de resistividad del terreno (Ω·m)		
Lugar	Primera Medición	Segunda Medición
SKID DA-2	88.2	84.4
SKID DA-5	79.6	81.1
SKID DA-6	90.9	91
Caseta Yagrumaje Norte	96.2	95.3
Edificio UB Minera	100	100

Conociendo todos estos datos se procedió a diseñar el modelo general de la línea para determinar a partir del comportamiento de diferentes variantes el mejor comportamiento de las protecciones ante las sobretensiones. Debido a la imposibilidad de determinar el lugar donde podría impactar el rayo, las simulaciones se realizaron previendo que la cantidad de descargadores sean iguales para todos los elementos que se pretenden proteger, es decir las excavadoras, y la subestación.

2.4 Simulación en MATLAB de los elementos del sistema eléctrico

Las sobretensiones que ingresan al circuito de media tensión en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara provienen fundamentalmente desde la línea aérea de la mina Yagrumaje, producto de descargas atmosféricas que inciden de forma directa o indirecta en las mismas, de manera que el estudio realizado en el capítulo anterior, ofrece las variantes de protección de mayor confiabilidad para estos casos.

Los nuevos sistemas de protección para líneas de transmisión existentes hoy en día son de dudosa certificación (Kuwabara *et al.* 2000; Rison 2004) y los tradicionales, como el hilo de guarda, son prácticamente inútiles para la protección de circuitos de distribución de media y baja tensión (Contreras 2003; Batista 2011), por tanto se impone realizar una validación de los descargadores valvulares que son una solución eficiente para reducir las sobretensiones siempre y cuando se realice una correcta selección y ubicación de los mismos (Espinosa 2005).

Por ello es necesario evaluar el comportamiento del sistema protegido con diferentes configuraciones en presencia de sobretensiones por descargas atmosféricas. Mediante la simulación del comportamiento de los descargadores valvulares ante la aparición de descargas atmosféricas para determinar cuál será la incidencia de las sobretensiones en las cargas asociadas a la línea.

El modelo utilizado para simular el comportamiento de la línea en presencia de descarga atmosférica se conformó con ayuda del SymPowerSystem, el bloque de una fuente sinusoidal con una onda impulsiva (ver Figura 2.4) se creó interconectando una fuente de tensión sinusoidal con una onda impulsiva con las características mostradas en la Figura 1.7. El modelo matemático que caracteriza esta forma de onda está sustentado en la ecuación de segundo grado mostrada en la ecuación (2.14), esta se obtuvo mediante ajuste de curvas a partir de la onda normalizada de 1,2 a 50 μ/s.

$$E = \frac{5{,}98 + 20{,}01t}{1 + 0{,}027t + 0{,}01t^2} \qquad (2.14)$$

Donde:

t: es el tiempo en microsegundo.

E: nivel de tensión de la onda en Volt.

En este bloque se debe configurar los siguientes parámetros.

a) Tensión nominal sinusoidal
b) tensión de cresta
c) Signo del impulso

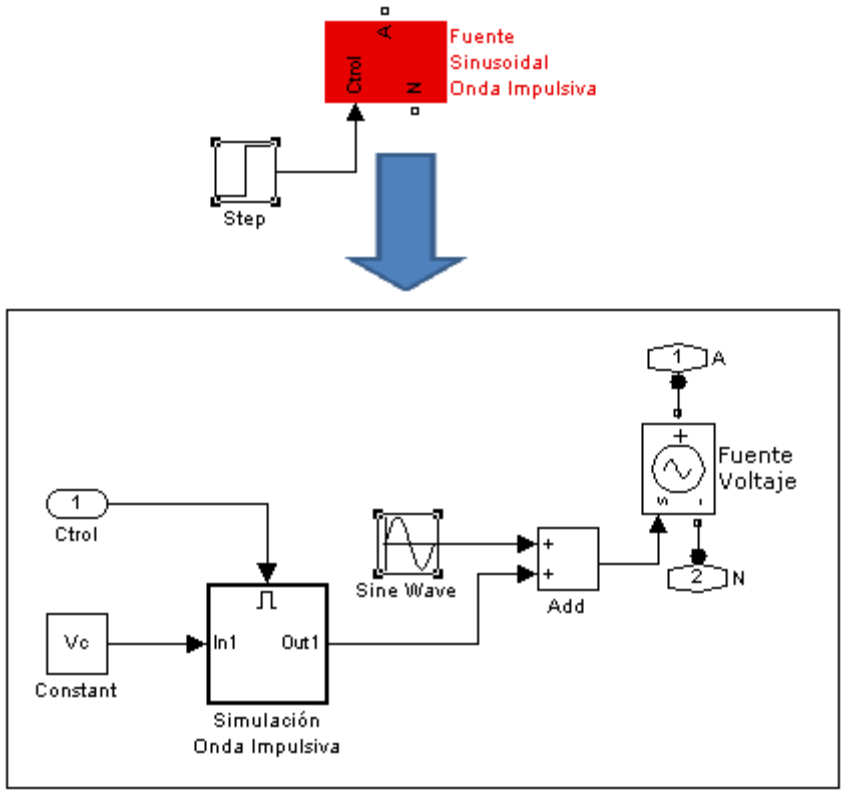


Figura 2.4 Modelo de una descarga atmosférica utilizado en la simulación

El modelo de la línea aérea depende fundamentalmente de su longitud, para este trabajo fue utilizado el tipo π (ver Figura 2.5), que se ajusta a las condiciones ideales para evaluar el efecto.

Este modelo (ver Figura 2.5) que se encuentra en el Toolboox SymPowerSystem tiene las siguientes características para líneas menores de 50 km.

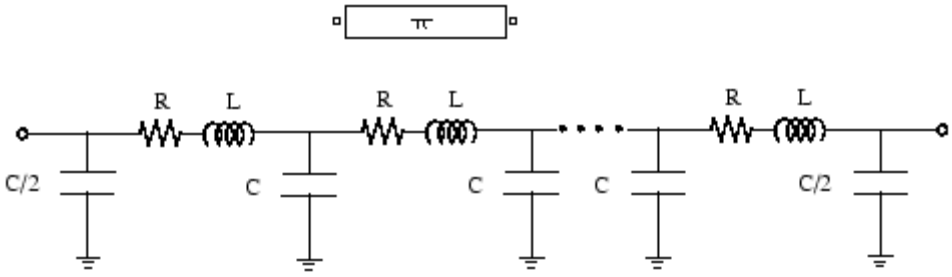


Figura 2.5 modelo de una línea eléctrica tipo π
fuente: (help, toolboox SymPowerSystem, Matlab)

$$R = r \cdot l\,\text{sec} \quad (2.15)$$

$$L = l \cdot l\,\text{sec} \quad (2.16)$$

$$C = c \cdot l\,\text{sec} \quad (2.17)$$

Donde:

lsec: longitud de la línea, en (km)

R: resistencia por unidad de longitud, en (Ω/km)

C: capacitancia por unidad de longitud, en (F/km)

L: inductancia por unidad de longitud, en (H/km)

En este bloque se debe configurar los siguientes parámetros.

r: Resistencia en (Ω)

c: Capacitancia en (F)

l: Inductancia en (H)

Descargadores valvulares (ZnO), este elemento también se encuentra en el toolboox SymPowerSystem se comporta como una resistencia no lineal, ante una sobretensión y en dependencia de la impedancia a través de la cual esté conectado a tierra será su acción (ver Figura 2.6).

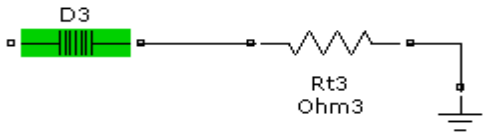


Figura 2.6 Descargador valvular aterrado.
Fuente: (toolboox SymPowerSystem, Matlab)

El comportamiento de la características de V & I se muestra en la Figura 2.7 donde cada uno de estos segmentos se determina a través de la ecuación exponencial (2.18).

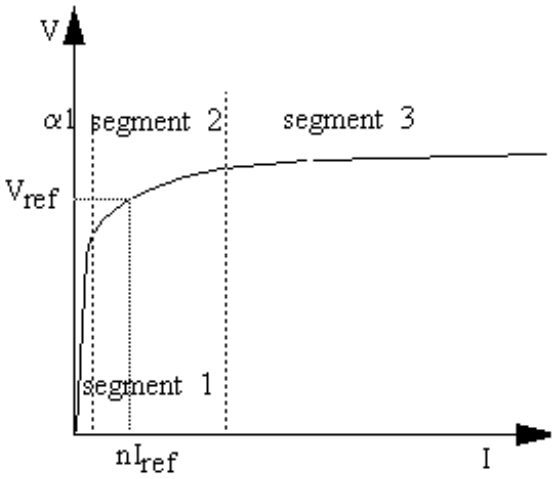


Figura 2.7 Representación gráfica de la característica tensión contra corriente (V/I) de un descargador valvular.

fuente: (help, toolboox SymPowerSystem, Matlab)

$$\frac{V}{V_{prot}} = \left(\frac{I}{I_{ref}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \qquad (2.18)$$

Donde:

Vprot: Tensión de protección (V)

Iref: Referencia de corriente por cada segmento (A)

V: Tensión en el sistema (V)

I: Corriente de descarga (A)

K y α: valores contante, diferentes en cada uno de los segmentos.

En este bloque se debe configurar los siguientes parámetros.

Tensión de protección

Número de columnas de MOV

Corriente de referencia por columna

2.4.1 Simulación en MATLAB de sobretensión para diferentes configuraciones de los descargadores valvulares.

Con el objetivo de demostrar las diferencias entre el impacto directo de una descarga atmosférica en la línea desprovista de protección y la línea protegida, se simula el esquema sin la presencia de descargadores valvulares (ver Figura 2.8), La simulación se realiza para tres niveles de sobretensión (20 kV, 40 kV, 60 kV), estas variantes son las más significativas, porque, por su impedancia, son las que podrían aparecen en la línea, si en esta impactaran descargas atmosféricas con los valores mínimos o máximo medidos, que presentan los rayos.

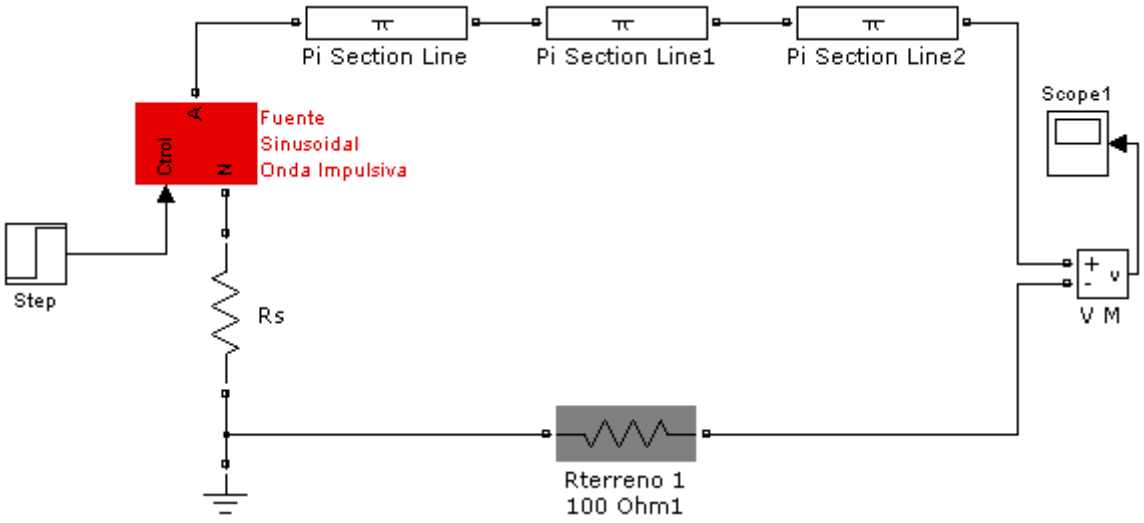


Figura 2.8 Simulación de la línea sin protecciones

En la Figura 2.9 se puede observar el comportamiento de la tensión en la línea frente a una onda de sobretensión de 20 kV, el gráfico muestra que el pico de tensión alcanza valores superiores a los 34,1 kV.

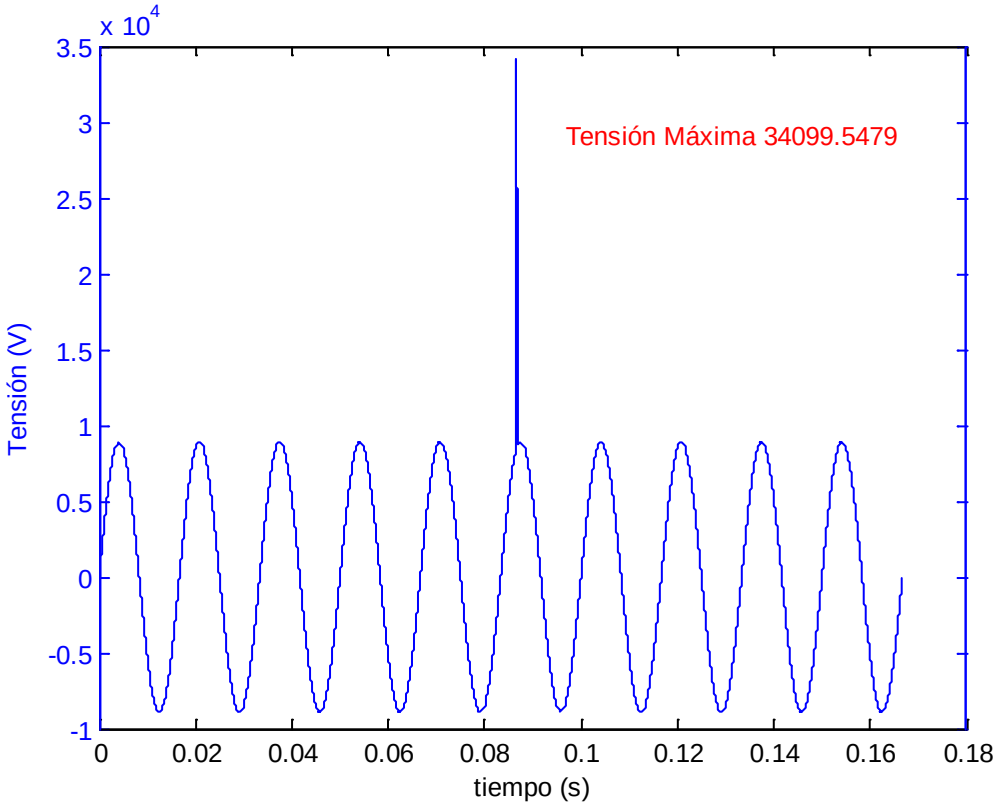


Figura 2.9 Comportamiento de la línea ante una onda de sobretensión de 20 kV

Para las misma condiciones de la línea se simulan sobretensiones para diferentes niveles de tensión (40 y 60 kV) ver Figura 2.10, la gráfica muestra que el valor pico de la onda puede alcanzar hasta 85,3 kV (ver Figura 2.10) valor que supera el Nivel Básico de Aislamiento (BIL) 75 kV, para cualquier equipo instalado en sistemas con tensión nominal de hasta 6,3 kV (Espinosa 2005).

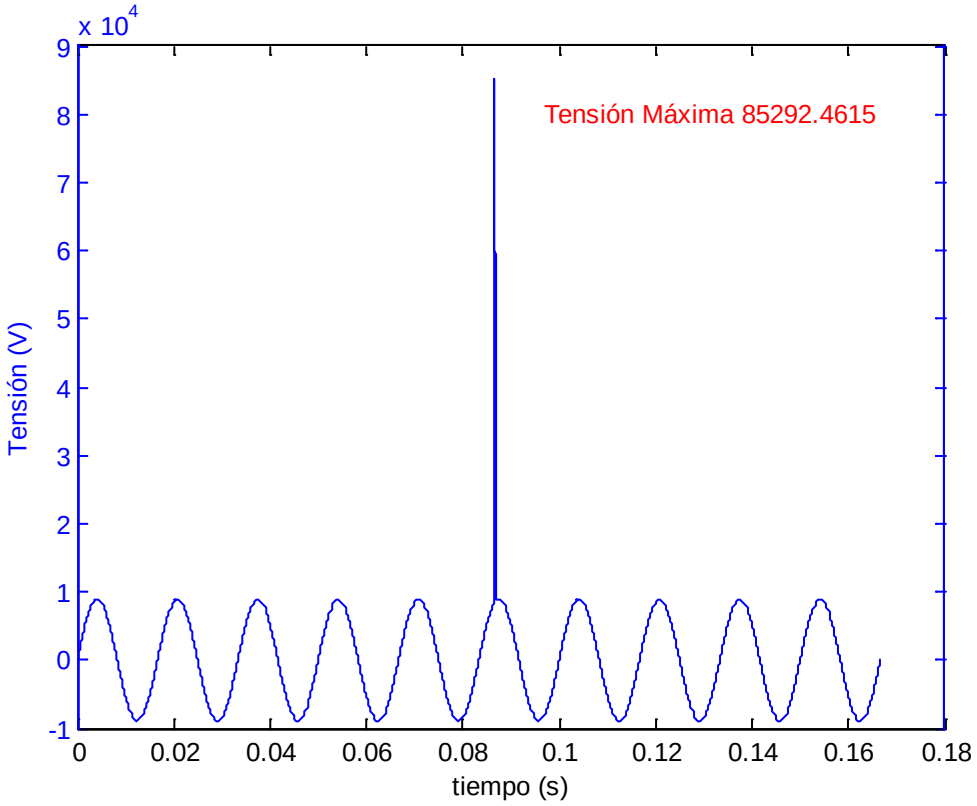


Figura 2.10 Comportamiento de la línea ante una onda de sobretensión de 60 kV.

2.4.1.1 Sobretensión en la línea protegida por un descargador valvular.

El modelo para la simulación de la línea protegida con un descargador se puede observar en la Figura 2.11. El nivel de protección del descargador (Vprot) se fijó en 9 kV de acuerdo a la ecuación (1.1) y la Figura 1.5.

$$\text{MCOV}=\frac{6.3\cdot\sqrt{2}}{1{,}234}=7.22\text{ kV}$$

$$7.22\text{ kV}<9\text{ kV}$$

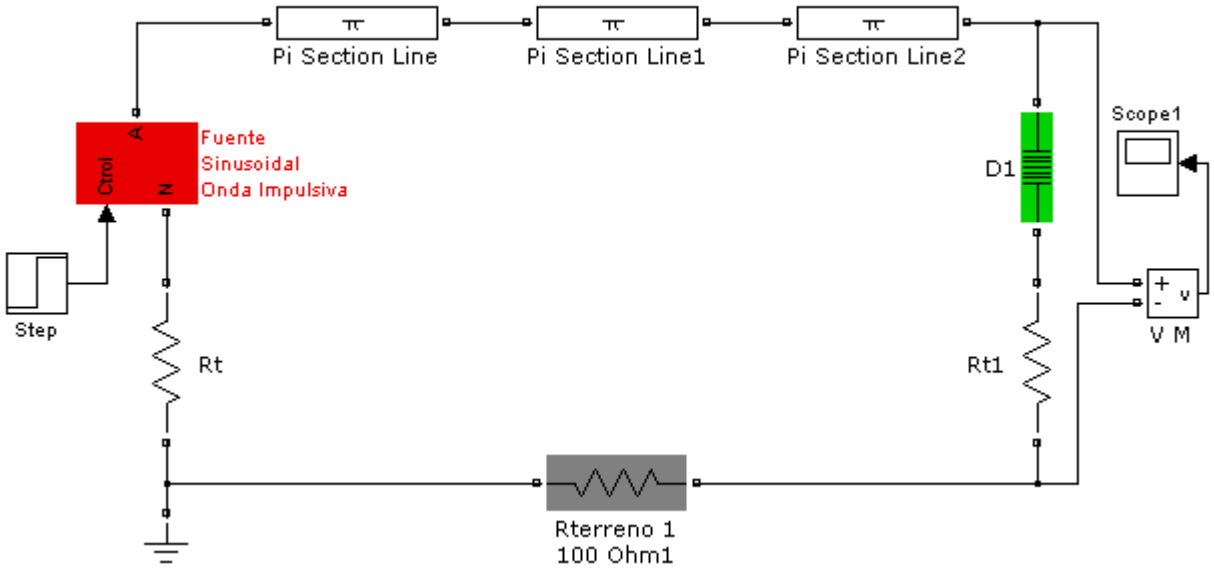


Figura 2.11 Modelo para la simulación de la línea protegida por un descargador.

En la Figura 2.12 se muestra el comportamiento de la tensión en la línea ante el impacto de una descarga de 20 kV, protegida por un descargador valvular aterrado por una impedancia de 7,9 Ω; en la figura se puede observar como el valor del pico de la onda (15,63 kV) es inferior al que se muestra en la Figura 2.9 por más de 18,465 kV.

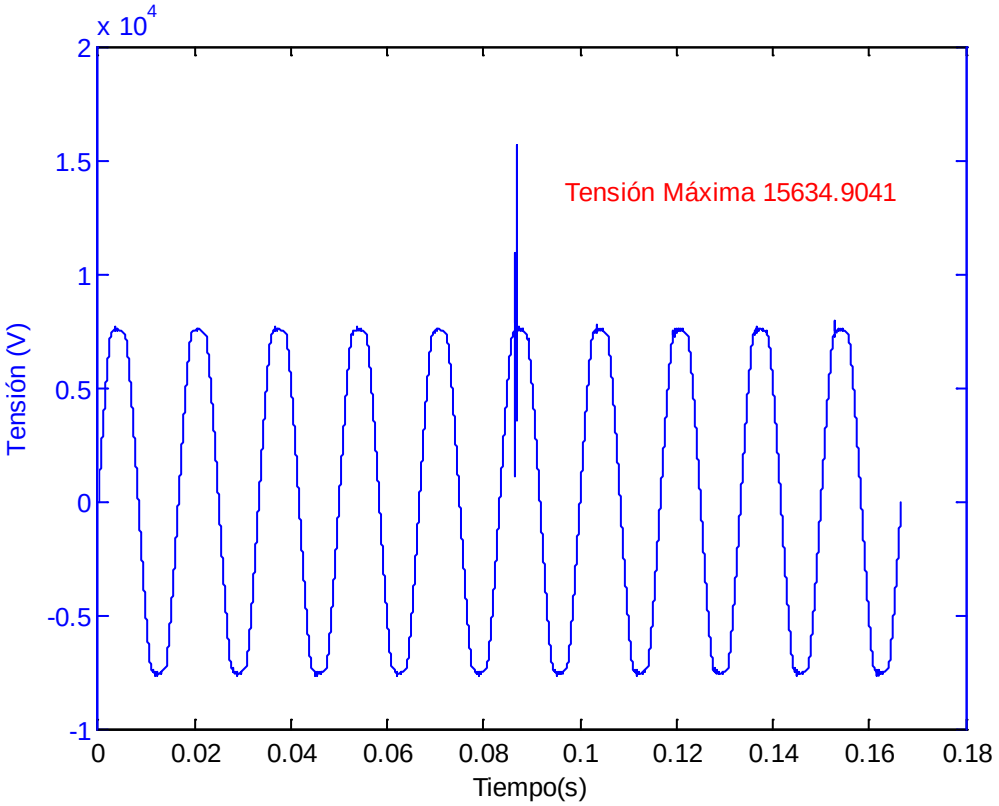


Figura 2.12 Línea ante onda de sobretensión de 20 kV protegida por un descargador valvular.

Para el caso de una descarga crítica de 60 kV en la Figura 2.13 se aprecia como con la inclusión del descargador valvular aterrizado a 7,9 Ω el pico de sobretensión se reduce hasta 49,52 kV. Como se puede observar en la Figura 2.13 este valor es 35,77 kV menor con respecto al valor que se obtuvo en la simulación el sistema sin protección ver Figura 2.10.

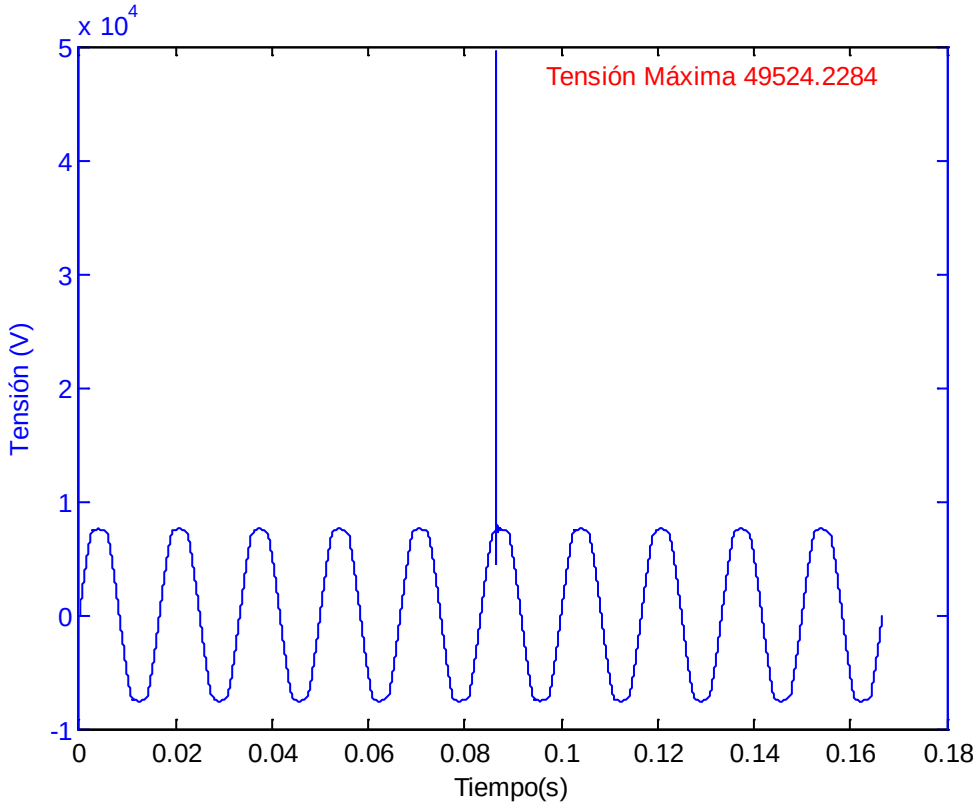


Figura 2.13 Línea ante onda de sobretensión de 60 kV protegida por un descargador aterrizado valvular.

2.4.1.2 Sobretensión en la línea protegida por dos descargadores valvulares.

El modelo que se utilizó para representar la línea protegida con dos descargadores se puede observar en la Figura 2.14. La selección del nivel de protección del segundo descargador valvular se seleccionó igual que el del primer modelo debido que a diferencia de otros tipos de protección los descargadores valvulares instalados en un circuito de igual nivel de tensión no se pueden seleccionar de forma escalonada o descendiente debido a que ante una sobretensión actuaría primero el menor disminuyendo de esta forma la acción de los restantes descargadores. El resto de los elementos del modelo se seleccionaron igual que en el anterior y las simulaciones se realizaron para los mismos niveles de sobretensión.

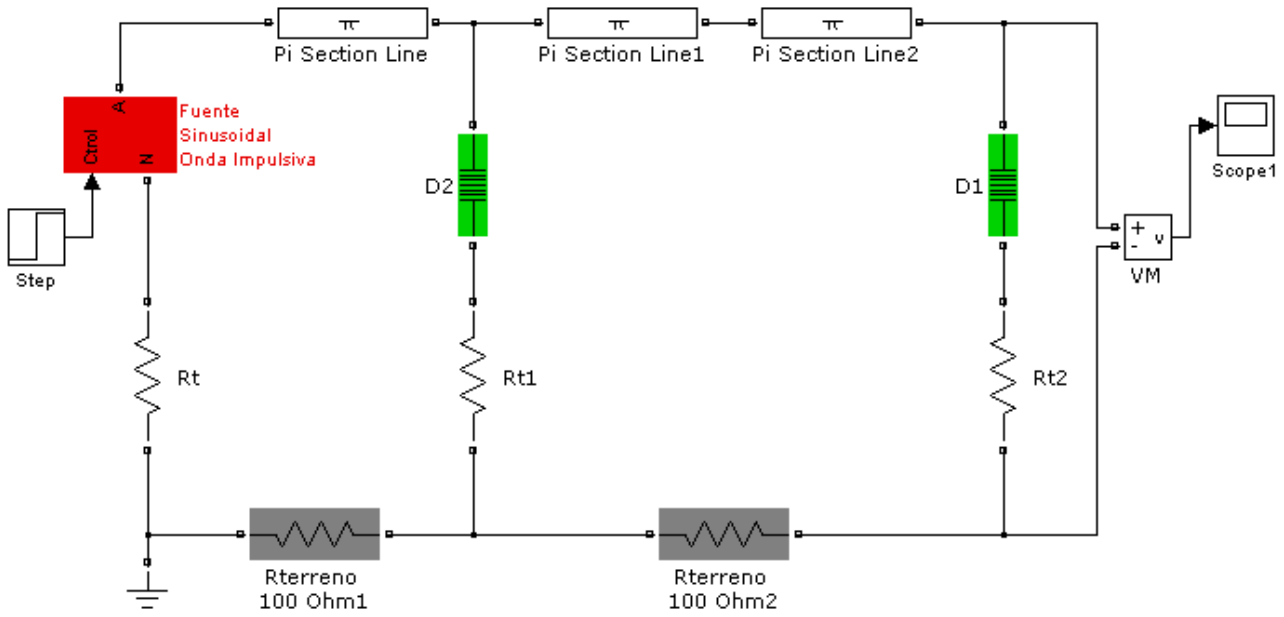


Figura 2.14 Modelo utilizado para representar la línea protegida por dos descargadores valvulares.

La simulación del modelo ante una onda de sobretensión de 20 kV, que es la de mayor posibilidad de incidencia en el circuito, demuestra que en este caso la acción combinada de los dos descargadores valvulares logra reducir en un margen mayor la onda transitoria hasta un nivel de 10,54 kV (ver Figura 2.15), este valor es inferior al resultado obtenido con un solo descargador (15,63 kV), por tanto, con el aumento de los descargadores, el nivel del pico de la onda se va reduciendo a valores cercanos a la tensión nominal del sistema.

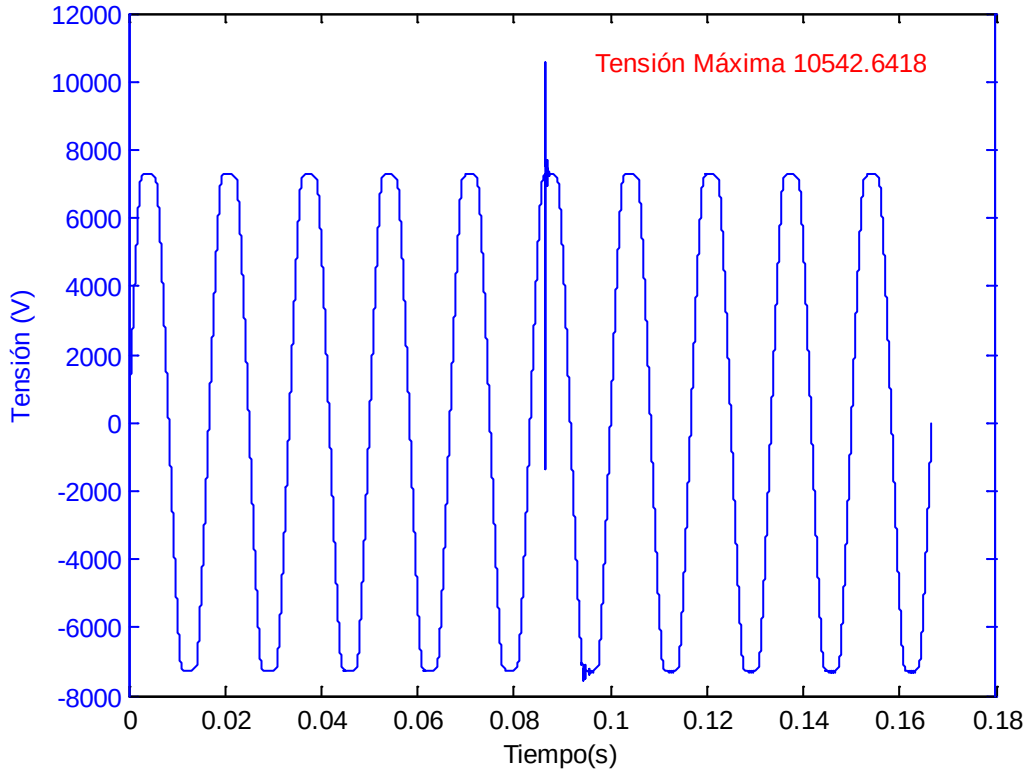


Figura 2.15 Simulación del modelo con dos descargadores ante una onda de sobretensión de 20 kV.

Este modelo ofrece resultados positivos en la simulación ante una onda de 60 kV debido a que los descargadores valvulares reducen el pico de la onda de sobretensión desde 85,3 kV en el inicio de la simulación sin descargadores hasta 25,13 kV con dos descargadores, lo que demuestra que la eficiencia de estos equipos es mejor en presencia de mayores valores de sobretensión, ver Figura 2.16.

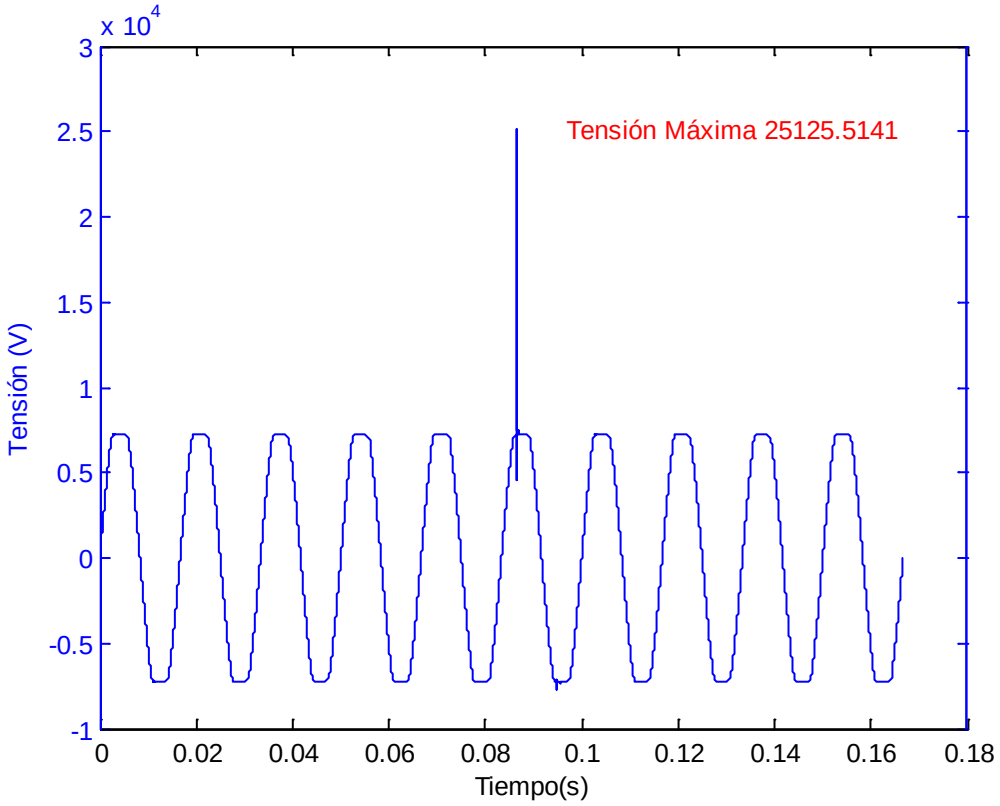


Figura 2.16 Simulación del modelo con dos descargadores ante una onda de sobretensión de 60 kV.

2.4.1.3 Sobretensión en la línea protegida por tres descargadores valvulares.

El modelo que se utilizó para representar la línea protegida con tres descargadores se puede observar en la Figura 2.17, el tercer descargador mantiene los mismos valores que los dos anteriores. El resto de los elementos del modelo se seleccionaron igual que en el anterior, las simulaciones se realizaron para los mismos niveles de sobretensión.

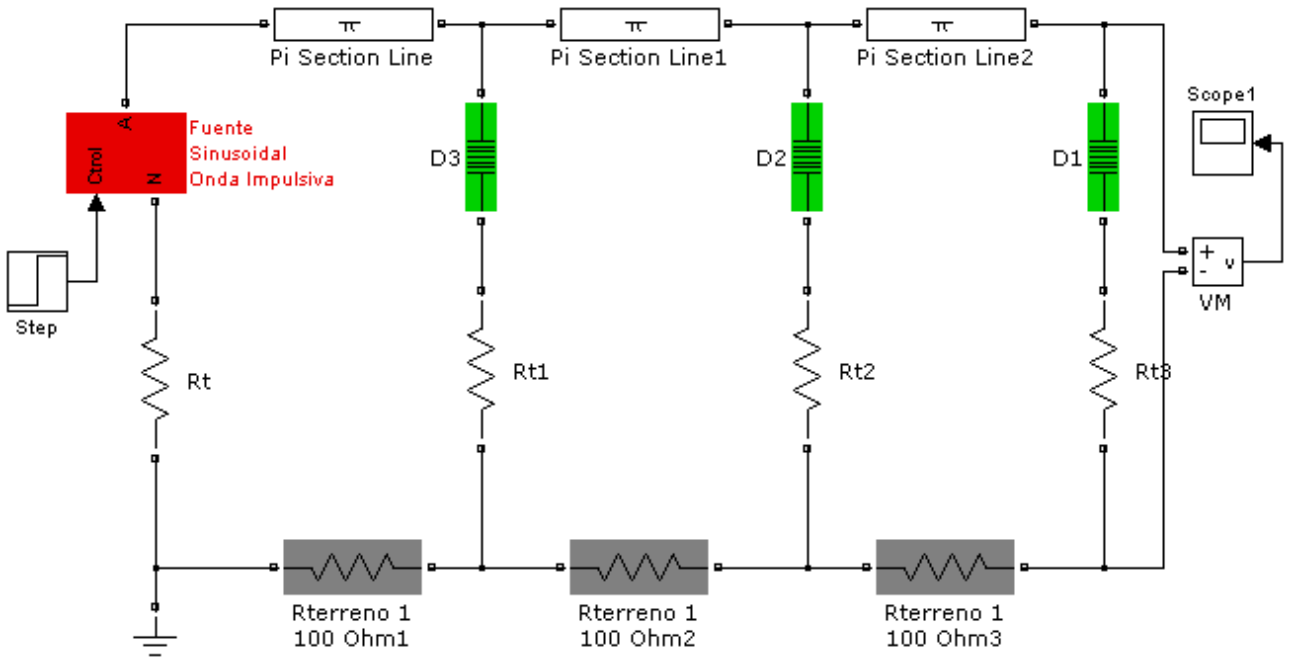


Figura 2.17 Modelo utilizado para representar la línea protegida por tres descargadores valvulares.

En la Figura 2.18 se observa el comportamiento del modelo con tres descargadores valvulares ante una onda de sobretensión de 20 kV. La gráfica muestra que el valor pico de la onda (7,47 kV) solo supera en un 18,6 % el valor nominal de tensión de la línea, factor que es aceptable según IEEE (Ieee C62.11 2005) y Nc (1987), para estas sobretensiones que ocurren en un periodo muy pequeño de tiempo y en un circuito donde el nivel básico de aislamiento de los equipo es elevado.

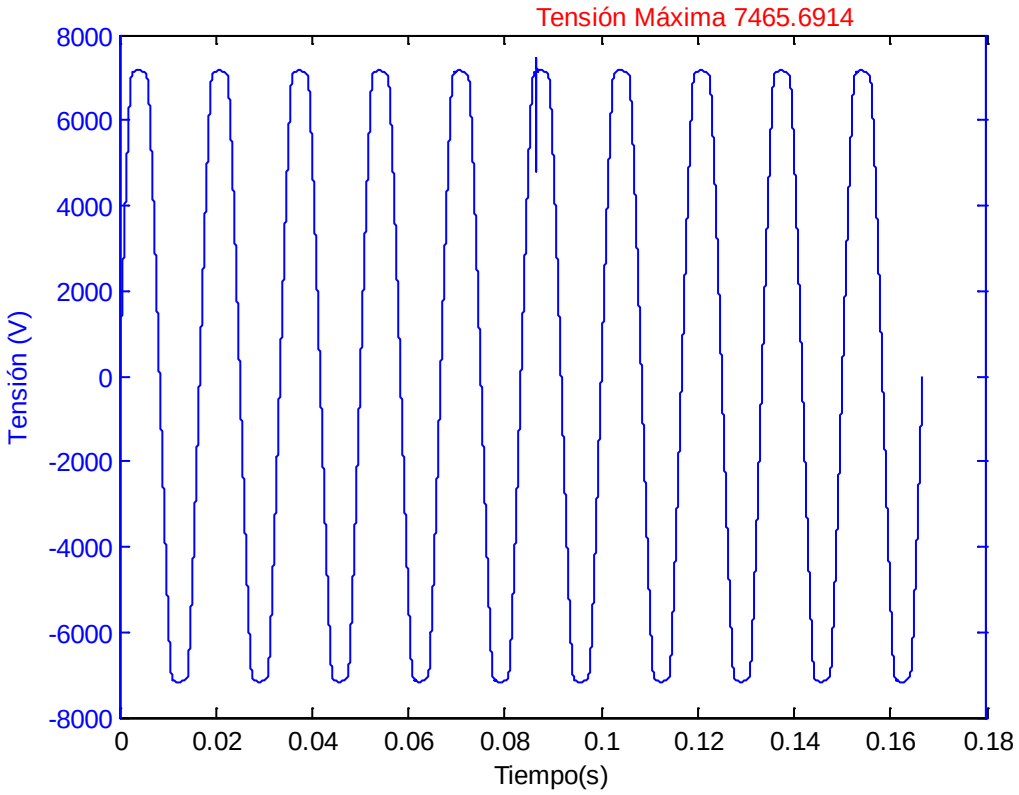


Figura 2.18 Simulación del modelo con tres descargadores ante una onda de 20 kV.

En el caso de la simulación de una onda de sobretensión de 60 kV (ver Figura 2.19), representa la situación más crítica que puede aparecer en el circuito, el pico de sobretensión solo alcanza 14,98 kV lo que demuestra la efectividad de esta configuración y de una correcta selección de los descargadores de ZnO.

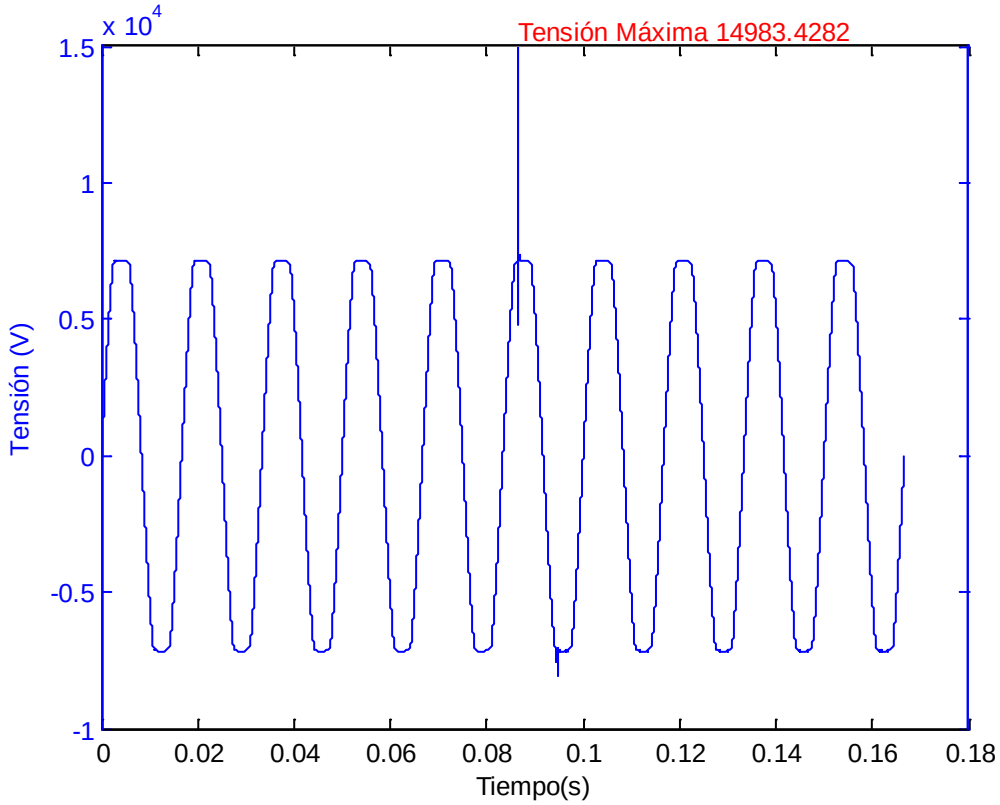


Figura 2.19 Simulación del modelo con tres descargadores ante una onda de 60 kV.

2.4.1.4 Sobretensión en la línea protegida por cuatro descargadores valvulares.

Para esta simulación se utilizaron los mismos elementos, solo se le agregó otro descargador valvular, en la Figura 2.20 se muestra el modelo utilizado.

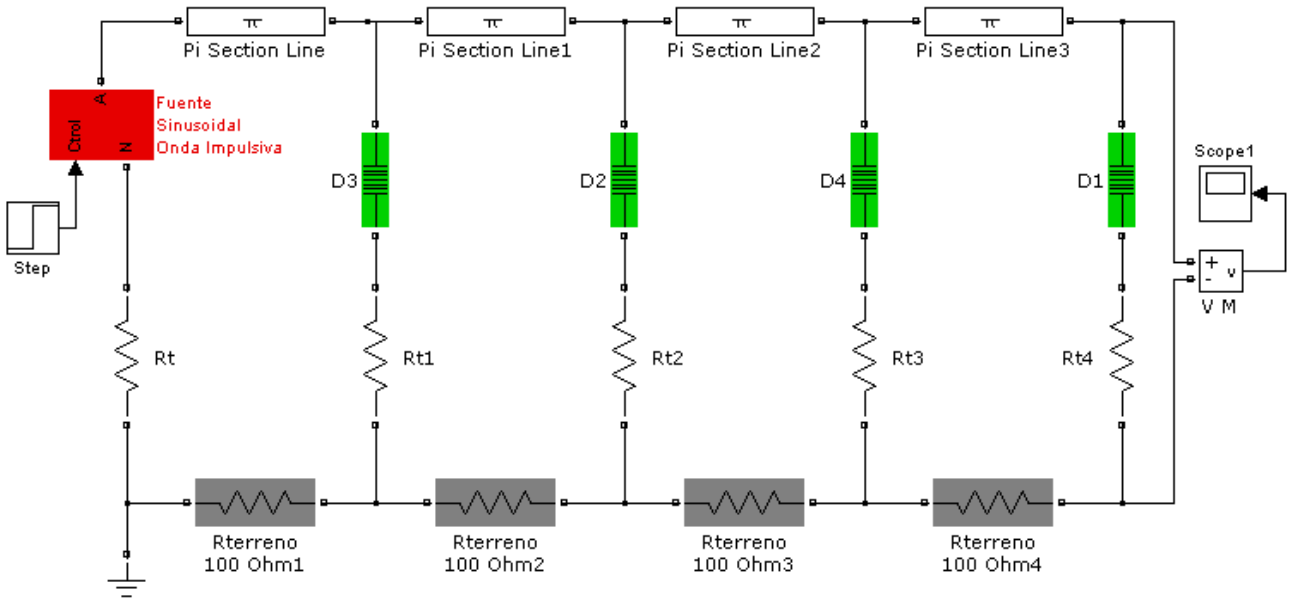


Figura 2.20 Representación de la línea protegida por cuatro descargadores valvulares.

En la Figura 2.21 se muestra el comportamiento de la tensión en la línea ante el impacto de una descarga de 20 kV, cuando la línea se encuentra protegida por cuatro descargador valvular aterrizado por una impedancia de 7,9 Ω; en la gráfica se puede observar como el valor del pico de la onda (7,27 kV) es inferior al que se obtiene con tres descargadores, aunque la disminución (0,2 kV) no representa una diferencia tan notable como en el casos de los modelos anteriores en que la diferencia entre uno y otro siempre fue mayor a 2 kV.

En el caso de una onda de 60 kV (ver Figura 2.21) la acción de los descargadores logra reducir con exelente resultados el pico de la onda de sobretención hasta 9,2 kV, lo que significa un valor 9,3 veces menor que el obtenido para la simulación con la línea desprotegida.

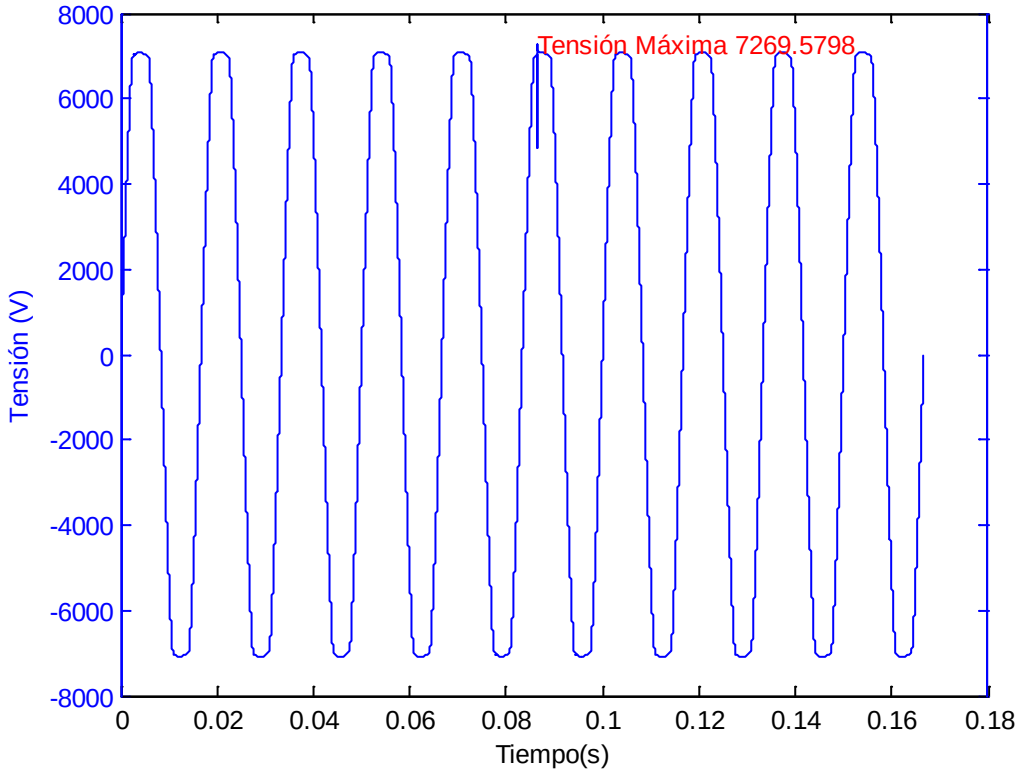


Figura 2.21 Simulación del modelo con cuatro descargadores ante una onda de 20 kV.

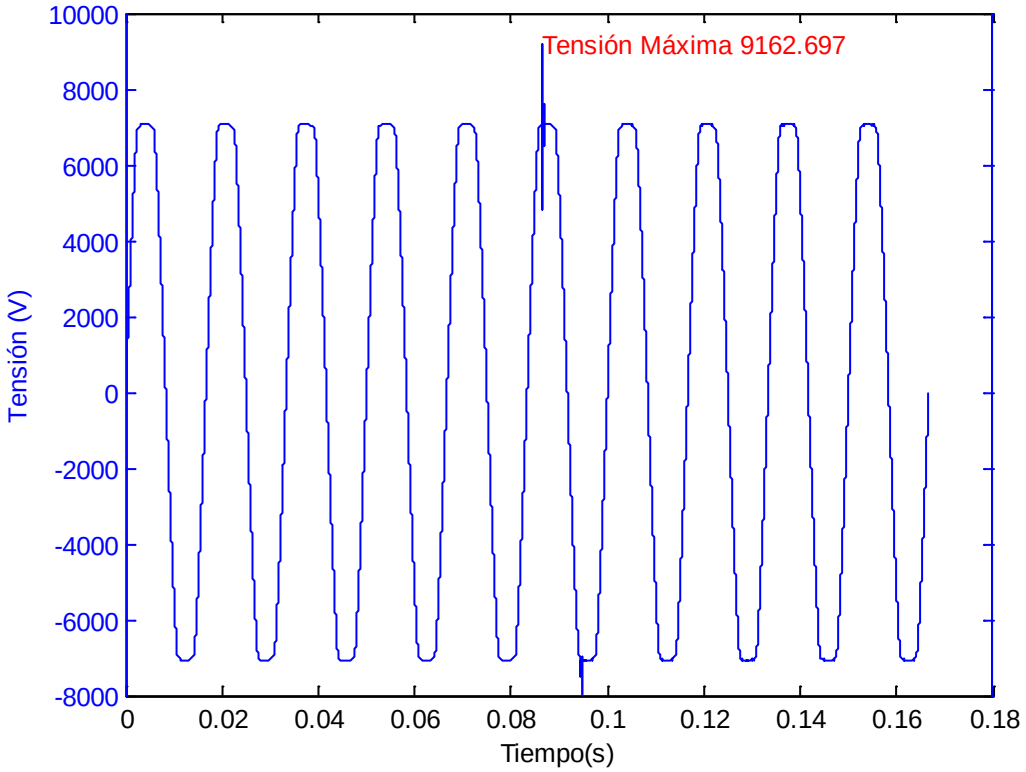


Figura 2.22 Simulación del modelo con cuatro descargadores ante una onda de 60 kV.

Para una mejor comprensión visual de los resultados de la simulación, se realizó el gráfico mostrado en la Figura 2.23, donde se muestra el resultado de todas las simulaciones realizadas para los tres tipos de ondas evaluadas y los cinco niveles de protección:

- Sin descargadores valvulares (SD),
- Con un descargador valvular (1D),
- Con dos descargadores valvulares (2D),
- Con tres descargador valvulares (3D)
- Con cuatro descargadores valvulares (1D).

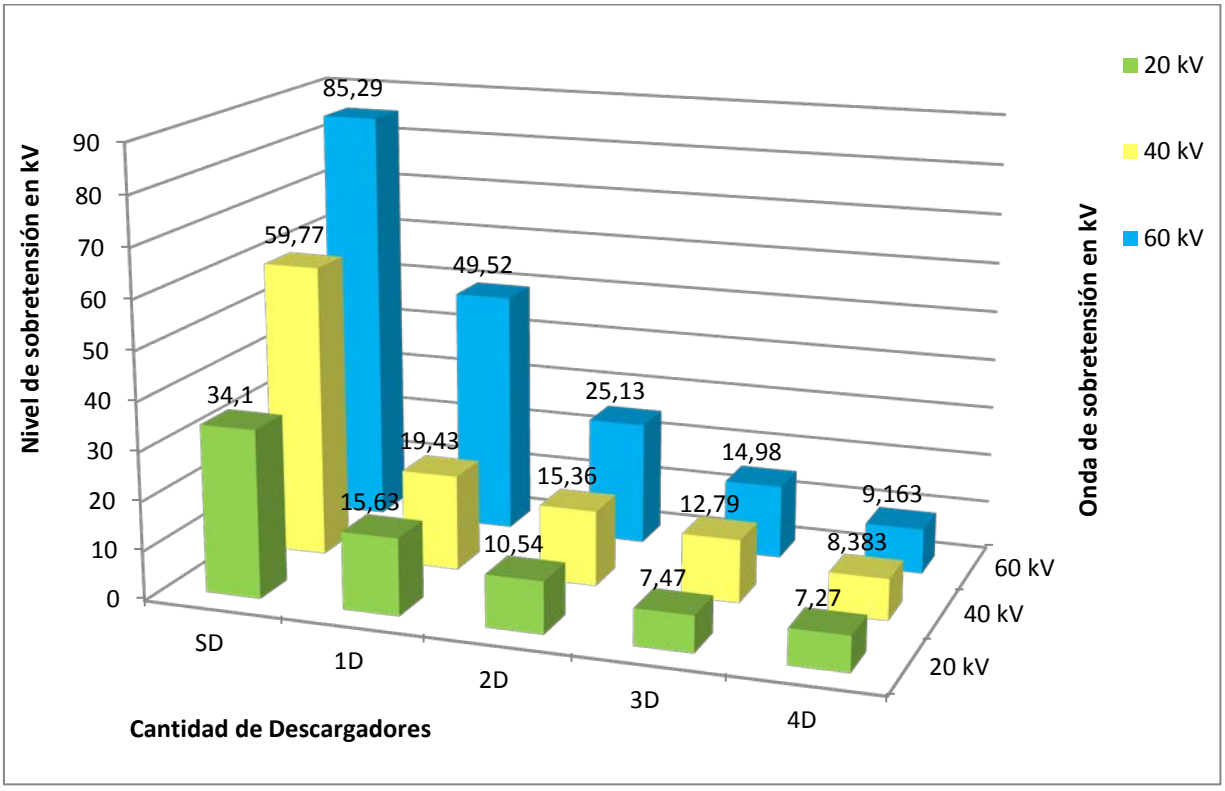


Figura 2.23 Resultados de las simulaciones.

Al observar los resultados mostrados en la Figura 2.23 se corrobora que la utilización de mayor número de descargadores permitirá disminuir el nivel de las sobretensiones, esto requeriría de una mayor inversión.

Para determinar el número óptimo de descargadores, en dependencia de un nivel adecuado de sobretensiones en la Figura 2.24 se muestra una comparación entre los parámetros técnicos y el costo económico de las diferentes variantes que se simularon, en

la figura se observa como el punto óptimo se encuentra entre 2 y 3 descargadores; considerando la variante más viable la de tres descargadores por alcanzar valores más cercanos a la tensión nominal de la línea.

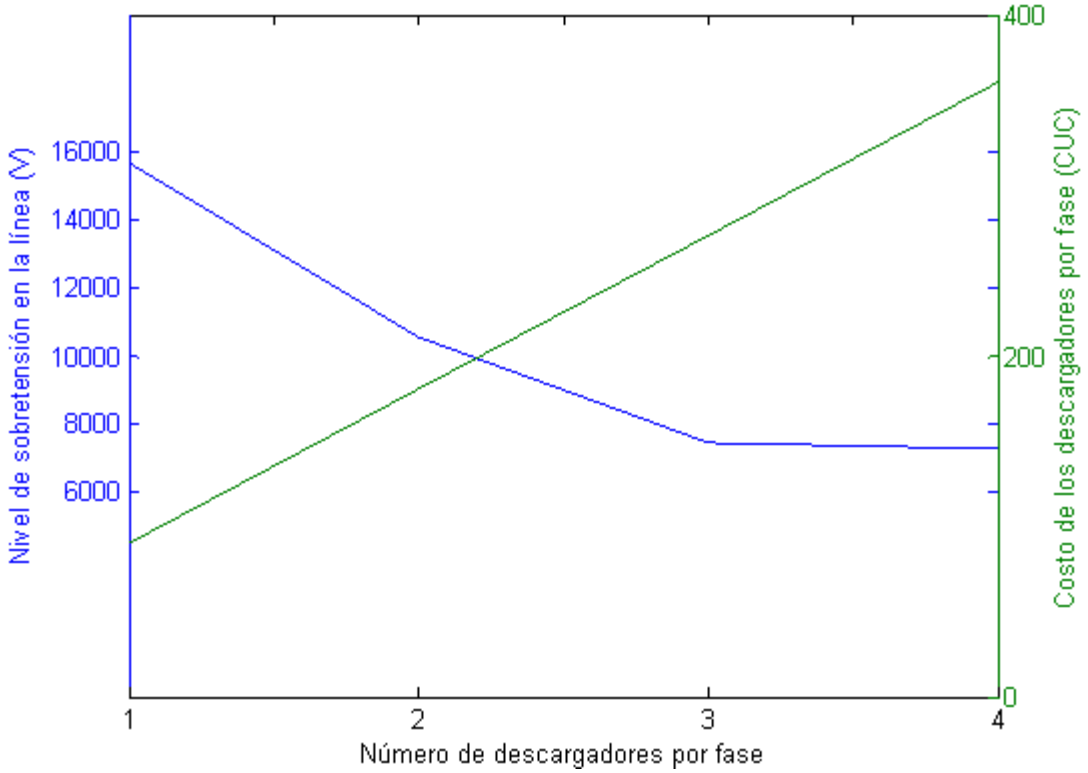


Figura 2.24 Comparación técnica económica del número de descargadores a utilizar.

2.5 Conclusiones capítulo 2

- El levantamiento topográfico y la caracterización de la línea permitió identificar las principales deficiencias técnicas existentes en el sistema de protecciones contra descargas atmosféricas.
- Con la utilización del MATLAB se simularon cinco modelos para medir las sobretensiones en la línea en presencia de descargas atmosféricas de diferentes magnitudes y evaluar la acción de los descargadores valvulares sobre ellas.
- El resultado de las simulaciones permitió seleccionar la variante de tres descargadores valvulares como mejor para la protección del esquema eléctrico de la mina.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN PROPUESTO

3.1 Introducción

Las propuestas para la modernización en un sistema eléctrico siempre deben estar basadas en un estudio previo, que permita ver las fortalezas y debilidades del objeto en cuestión y compararlo con la nueva propuesta de forma que se pueda discernir si es ventajoso realizar el cambio desde el punto de vista técnico. Por esta razón este capítulo se dedica a fundamentar la propuesta técnica para la protección de la línea de la mina, con vista de reducir las sobretensiones que afectan a los equipos instalados en las subestación 2SD de la Empresa ECG. Además, se determina el costo general de la inversión para lograr la protección de la línea y reducir la mala calidad en el suministro de energía.

3.2 Validación técnica de la propuesta que se implementa

Con las simulaciones del capítulo anterior se demostró que la utilización de tres niveles de protección con descargadores valvulares en la línea de la mina Yagrumaje de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara es factible para la disminución de las sobretensiones.

Teniendo en cuenta lo anterior se evalúan tres propuestas para la configuración del esquema de protecciones contra descargas atmosféricas que incluye el sistema instalado actualmente.

De todas las descargas eléctricas que incidan sobre la línea, la de mayor importancia es aquella que ocurre cerca de la subestación, ya que afecta los motores sincrónicos conectados a ellas y el proceso productivo directamente.

El esquema actual como se observa en la Figura 3.1 está compuesto por descargadores valvulares que protegen a cada uno de los motores de la Sección I en la subestación 2SD y los motores sincrónicos de las excavadoras. La línea solo se protege con descargadores en la salida de la subestación.

Este esquema provee mayor seguridad a los motores asociados a la Sección I de la subestación 2SD, ya que para cualquier lugar que incida una descarga en la línea siempre estarán resguardados por dos niveles de protección, todavía insuficiente. No obstante la protección de la línea no es la más racional, pues solo cuenta con un nivel de protección, insuficiencia que ha provocado en ocasiones la apertura de una de sus fases por la incidencia de una descarga atmosférica.

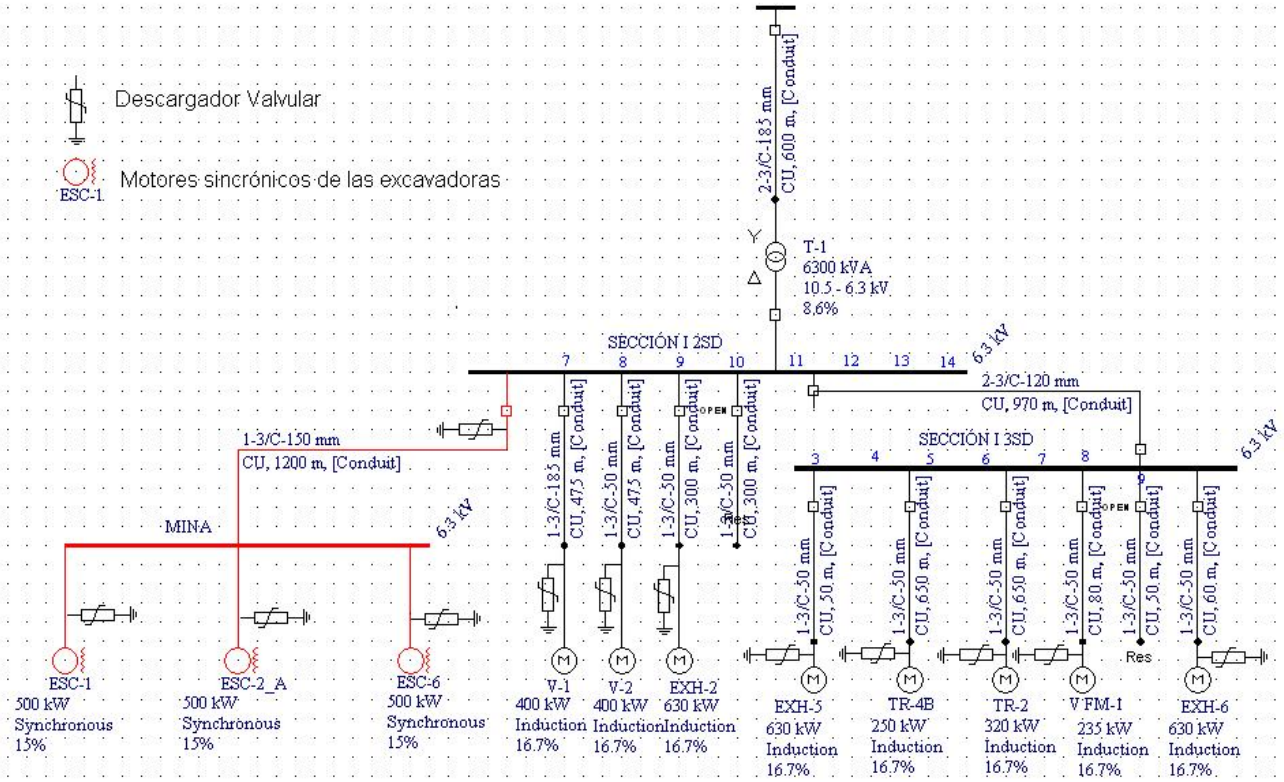


Figura 3.1 Configuración actual del sistema de protección de la línea Yagrumaje.

La primera variante aunque protege de forma general, no garantiza protección contra la falla más importante que pueda originar una descarga eléctrica.

La segunda variante se propone a partir de los resultados de las simulaciones como se muestra en la Figura 3.2. En este caso la utilización de los tres niveles de protección permite un elevado porciento de seguridad en la línea Yagrumaje, sin embargo en el caso de incidencia de una descarga eléctrica de alto nivel (alrededor de 300 kA), cercana a la cabeza de la línea, las protecciones no serían suficientes para impedir que la sobretensión

afecte los motores conectados a la Sección I de la subestación 2SD, hecho que influye de forma negativa en el proceso productivo.

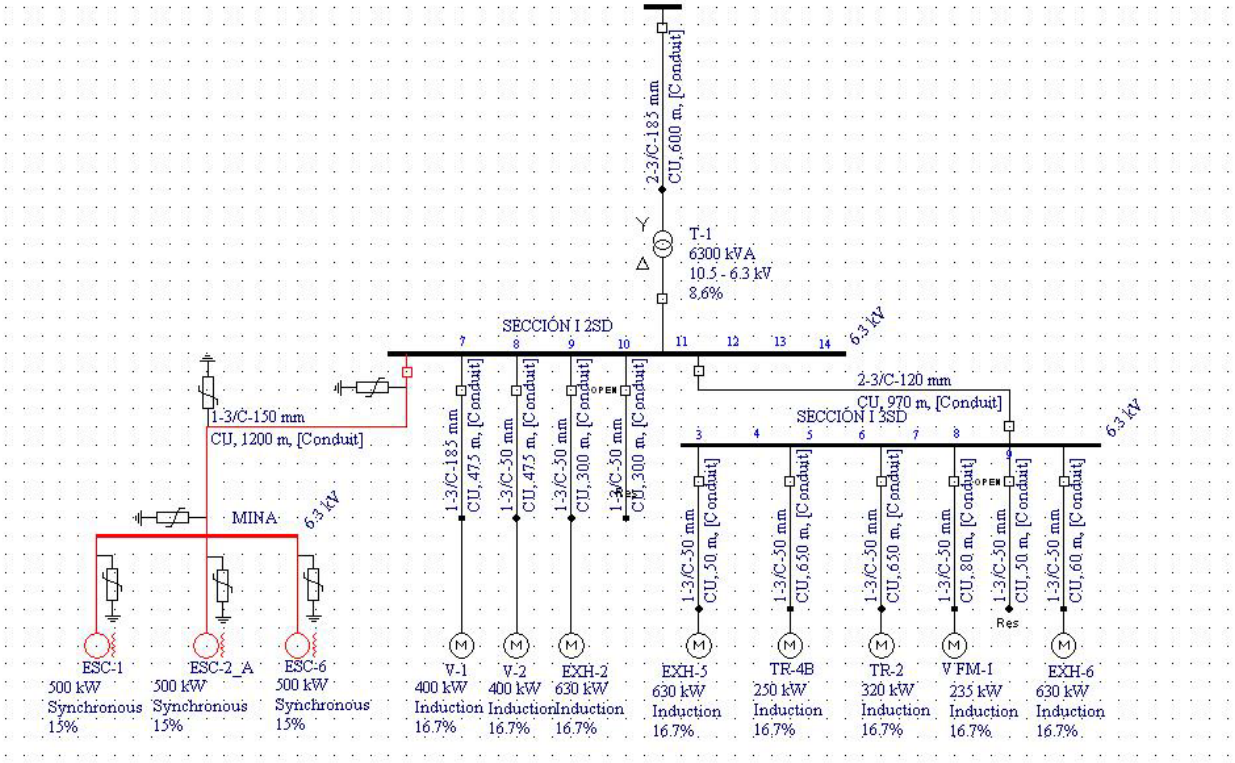


Figura 3.2 Esquema de la línea Yagrumaje protegida por tres niveles utilizando descargadores valvulares.

La segunda variante tampoco garantiza protección contra la falla más importante que pueda originar una descarga eléctrica.

La tercera variante consiste en alimentar la línea Yagrumaje directamente desde el sistema eléctrico de potencia (SEP) mediante una subestación, configuración que se muestra en la Figura 3.3 y permite mantener un alto nivel de protección para la línea Yagrumaje de acuerdo a los resultados de las simulaciones y elimina totalmente la posibilidad de sobretensiones, producto a descargas atmosféricas en el esquema de 6,3 kV de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Esta variante concuerda con las inversiones futuras relacionadas con la presa de colas de la Empresa, que obligará a cambiar el trazado de la línea debido a que la presa estará enclavada en el área que recorre parte de la línea Yagrumaje.

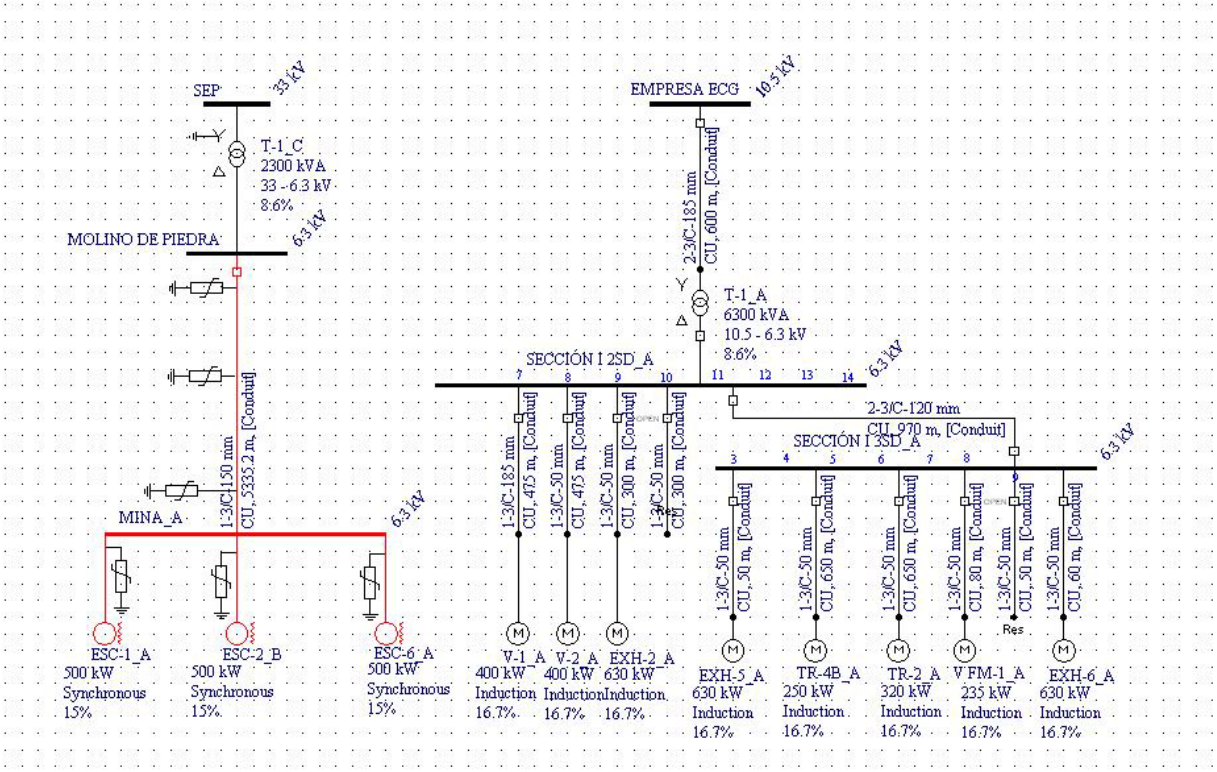


Figura 3.3. Alimentación de la línea Yagrumaje desde el SEP

La subestación debe mantener un adecuado nivel de tensión en todos los puntos de la red, permitir ser controlada desde la Empresa ECG para facilitar los trabajos de mantenimiento, evacuación de las averías en la línea o las excavadoras, y estar correctamente protegida contra la posible acción de descargas atmosféricas que puedan incidir en la línea o en ella misma. En anexo 1 se muestra la posición escogida para la subestación y el trazado más idóneo para unir la línea a esta.

El principal elemento a tener en cuenta para la nueva subestación es el transformador a utilizar. Partiendo de los niveles de tensión que debe manejar por el enrollado del primario y el secundario y la potencia necesaria para alimentar las excavadoras se determinó seleccionar un transformador de 2,3 MVA, 33/6,3 kV. Para tener el control de la subestación desde la Empresa y teniendo en cuenta que esta última se encontrará a una

distancia considerable de la segunda, se debe utilizar un interruptor, recerrador relé digital NULEC por el lado de baja tensión del transformador ya que este permitirá telecomandarlo desde el despacho eléctrico y representará una protección segura contra los cortocircuitos y fallas longitudinales que puedan aparecen en la línea.

El tramo de línea del circuito minero de Yagrumaje Norte seguirá el mismo recorrido que tiene en la actualidad, pero la línea será rematada posterior al tramo que está al pasar la derivación que alimenta la nave de secado de sulfuro, de esta forma la línea no tendría que pasar por la zona seleccionada para la nueva presa de colas.

La tercera variante por ser la que asegura un mayor nivel de protección para todo el sistema y garantiza la eliminación de las sobretensiones en el esquema de 6,3 kV de la Empresa es la más acertada técnicamente. Protege de forma general y garantiza protección contra la falla más importante que pueda originar una descarga eléctrica.

3.3 Análisis económico.

3.3.1 Costo total de la inversión para la tercera variante

Para la materialización del proyecto es necesaria la adquisición y movimiento de gran cantidad de materiales para la construcción de la obra, cabe destacar que el taller eléctrico de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara cuenta con toda la fuerza capacitada y el equipamiento necesario para realizar una obra como la que se propone en el trabajo de maestría, por lo que en el análisis sólo se tendrá en cuenta el valor de los medios necesarios para la construcción de la línea y el gasto en horas trabajo de los obreros, ver Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Costos de la inversión para implementar la variante seleccionada.

Elemento	Unidad	Cant	Precio pu	Precio CUC
Dropout	U	3	37,08	111,24
Descargadores Valvulares	U	3	90,14	270,42
Poste de hormigón	U	1	355,90	355,9

Cruceta de 9*12´	U	1	53,40	53,4
Aisladores de disco de suspensión de polímero	U	6	24,38	146,28
Angular V63	U	14	10,42	145,88
Tornillo de máquina 5/8*12´	U	24	2,01	48,24
Tornillo de máquina 1/2*1,5´	U	54	0,48	25,92
Conectores ampact	U	6	2,65	15,9
Eslabón Grillete	U	6	0,57	3,42
Grampa de remate	U	6	4,10	24,6
Angular de remate	U	6	4,18	25,08
Varilla de tierra 5/8*6 ´	U	30	14,59	437,7
Cable de cobre para la malla	Kg	40	6,04	241,6
Cable de cobre para bajante de los descargadores	Kg	18	50,40	907,2
Transformador	U	1	35000	35000
Interruptor recerrador NULEC	U	1	14 000	14000
Cable aluminio 158 (AAAC-158)	Kg	180	4,2	756
Pica de tierra 19x1500mm rosca 3/4 cobrizada,	U	30	27,2	816
Pica de tierra 19x3000mm rosca 3/4 cobrizada,	U	21	55,77	1171,16
Electrodo dinamico aplirod ø 28mmx2,5m con grapaat-020f	U	30	178,30	5349,12
Descargador válvular/pararrayos polimero	U	22	80,54	1771,82
Cable de cobre desnudo trenzado de 16mm^2,	MTS	500	1,97	985,6
Contador electromecánico de rayos at-001g	U	2,00	311,81	623,62
Cable de Cu desnudo trenzado de 50mm^2,	MTS	500	5,731	2867,2
Kit de heramientas básicas para soldadura exotérmica	JGO	8	62,72	501,76
Molde cable sobre pica en t, código c50/t15/64,	U	8	103,04	824,32
Molde para soldadura exotérmica cable en t horizontal,	U	4	103,04	412,16
Molde para soldadura exotérmica cable sobre cable en x,	U	4	112	448
Molde para soldadura exotérmica cable pica en t vertical, c50/t20/64,	U	8	129,20	1033,63
E-0090 10 u, Soldadura apliweld 90gr r,m,+ iniciador	U	160	46,05	7368,70
E-0115 10 u, Soldadura apliweld 115gr r,m,+ iniciador	U	160	53,76	8601,6
Pinza at-50n	U	8,0	91,39	731,136

Mejorador de conductividad del terreno tipo gel at-032l,	U	10	61,82	618,24
Mejorador de conductividad del terreno, tipo: at-032l,	U	10	61,82	618,24
Preparado mejorador aplirod 35h 50kgs	U	15	125,44	1881,6
Cable de al, ACCR la78 ø 11,34mm	MTS	2 100	1,74	3655,68
Grapa de suspensión para cable de 5-12mm, tipo gs-1,	U	20	4,48	89,6
Viga canal u100 long, 2400,	U	20	204,8	4096
Espárrago m16x300 5,6 zincado con 2 tuercasy 2 arandelas	U	39,0	3,64	142,27
Pasta de sellado at- 66n,	U	160	22,4	3584
Polvo de soldadura para molde e-0115 10 u, soldadura apliweld 115gr,	U	160	53,76	8601,6

Total Costos Directos	**106549,0624**
Gastos Indirectos de Obra (12,4 % de Gastos Directos)	**13212,08**
Facilidades Temporales (4 % Gastos Directos y Gastos Indirectos de Obra)	4790,445
Otros Gastos Adicionales 2 % Gastos Directos y Gastos Indirectos de Obra)	2395,22
Gastos Bancarios (2 % Gastos Directos y Gastos Indirectos de Obra)	2395,22
Seguro de Obra (0,35 % Gastos Directos y Gastos Indirectos de Obra)	419,16
Imprevistos (4 % Gastos Directos y Gastos Indirectos de Obra)	4790,45
Transportación de Suministros y Medios del Constructor (15 % GD y GIO)	17964,17
Contribuciones, aportes y otros (2 % Gastos Directos y Gastos Indirectos de Obra)	2395,22
Subtotal Presupuestos Independientes	**35149,90**
Costo Total de la Inversión	**154 911,04**

Aunque el costo total de la inversión (154 911,04 CUC) pudiera parecer alto no es significativo si se compara con las ventajas y el ahorro que traería en el futuro este proyecto. Aunque estudios anteriores que se han realizado en la línea aérea han determinado el tiempo de amortización de la inversión basándose en las pérdidas que las averías en la línea provocan en la producción de níquel, dicho cálculo es poco confiable ya que estas averías tienen un carácter aleatorio y predecir su ocurrencia sería especular, además las averías en los elementos de la línea aérea no repercuten de forma instantánea sobre la producción ya que la fábrica siempre mantiene una reserva de mineral. En la

actualidad con el objetivo de eliminar estas averías la fábrica realiza en el sistema costosas inversiones, ejemplo de estas inversiones son los 14 armarios de descargadores valvulares acoplados a condensadores para los motores de los exhauster de secadero, con un precio total de 218 319,36 CUC, que excede en más de 60 000 CUC el costo de la propuesta de inversión.

3.3.2 Validación de la propuesta económica

Las amortizaciones de inversiones en proyectos de protecciones eléctricas son por lo general de difícil demostración, producto a que estos dispositivos pueden permanecer en el sistema por un largo tiempo y si no hay fallas estos no actuarían en ningún momento. La existencia o no de protecciones en un sistema eléctrico no incide en el comportamiento instantáneo de la producción de una industria, pero su acción en los momentos en que ocurren fallas, sí evitan pérdidas que pudieran ser de gran valor o detener el proceso de producción completo de la industria.

En uso de los pararrayos con cuerno de arqueo en circuitos de distribución en el departamento de Escuintla para mejorar la continuidad del servicio eléctrico, Contreras (2003) define cinco de las técnicas más utilizadas para comprobar las soluciones de los proyectos de protecciones eléctricas estás son:

- Solución óptima.
- Comparación absoluta.
- Comparación relativa.
- Comparación económica primaria.
- Evaluación costo beneficio.

De estos en la investigación se determinó utilizar el método de Comparación relativa, este consiste en comparar los méritos relativos de las diferentes alternativas que son posibles soluciones.

En la investigación realizada de proyectos anteriores se propone una variante de solución utilizando descargadores valvulares y el Sistema de Arreglo de Disipación (DDS) que

sumándole el costo de los descargadores valvulares necesarios para proteger los exhausters alcanzaría el monto de 305 084 CUC según Conte (2008); en el trabajo titulado "Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Cdte. Ernesto Che Guevara" de Batista (2011) se propone una solución utilizando descargadores valvulares utilizando los dispositivos mencionados en el epígrafe 1.6.1. Esta nueva propuesta también tienen un alto valor al sumar los descargadores de los exhausters 276 720,76 CUC.

La solución de soterrar la línea representa una acertada solución técnica presentada por Noa (2012). Este proyecto de mayor complejidad constructiva representa una inversión de 872 785,64 CUC y la variante menos aceptada por los especialistas de la Empresa que plantean que por las características del terreno y el trabajo con equipos pesados de minería un sistema soterrado podría traer consigo un gran número de averías de otra índole.

En la Tabla 3.2 se observa que la variante propuesta en el trabajo no solo es acertada técnicamente sino que es la más económica de todas las propuestas hasta la actualidad.

Tabla 3.2 Costo de las variantes propuestas en los últimos 5 años.

Investigaciones Precedentes	Propuesta	Costo (CUC)
(Conte 2008)	DDS+descargadores valvulares.	305 084,00
(Batista 2011)	DDS+descargadores valvulares.	276 720,76
(Noa 2012)	Soterrado de la línea.	872 785,64
(Hernandez 2012)	subestación+descargadores valvulares.	**154 911,04**

3.4 Conclusiones capítulo 3

- El análisis técnico demostró que la línea Yagrumaje alimentada desde el SEP y protegida por tres niveles con descargadores valvulares, elimina la posibilidad de ocurrencia de la falla más importante que pueda originar una descarga eléctrica en la Empresa ECG.
- El costo total de la inversión propuesta se determinó en 154 911,04 CUC.

- Mediante la comparación relativa se determinó que la propuesta es la más rentable económicamente de las realizadas en los últimos 5 años.

CONCLUSIONES GENERALES

- Las simulaciones demuestran que la reducción de sobretensiones no tienen una dependencia lineal con respecto al número de descargadores. Se obtuvo que el modelo de tres descargadores valvulares es la mejor variante, reduce las sobretensiones a un valor (7,47 kV) comprendido dentro de los normado por Nc (1987), y resultó una opción viable económicamente.
- El levantamiento topográfico y la determinación de los parámetros eléctricos de la línea aérea permitió identificar las principales deficiencias de las protecciones y modelar su comportamiento en SymPowerSystem de Matlab.
- La corrección del sistema de protecciones de la línea aérea se realizó a partir de los resultados de la modelación y simulación del comportamiento de los descargadores valvulares en presencia de sobretensiones de diferentes magnitudes, y se demostró que la línea Yagrumaje alimentada desde el SEP y protegida por tres niveles con descargadores valvulares elimina la posibilidad de ocurrencia de la falla más importante que pueda originar una descarga eléctrica en la Empresa ECG.

RECOMENDACIONES

- Extender en el análisis de las protecciones las probabilidades de ocurrencia de las descargas atmosféricas en función del terreno y las condiciones climáticas.
- Comprobar la efectividad del modelo en líneas de alta tensión en sistemas de transmisión y subtransmisión.
- Aplicar elementos de inteligencia artificial en la evaluación de un sistema de protecciones, tomando como soporte los resultados de la simulación para diferentes condiciones.

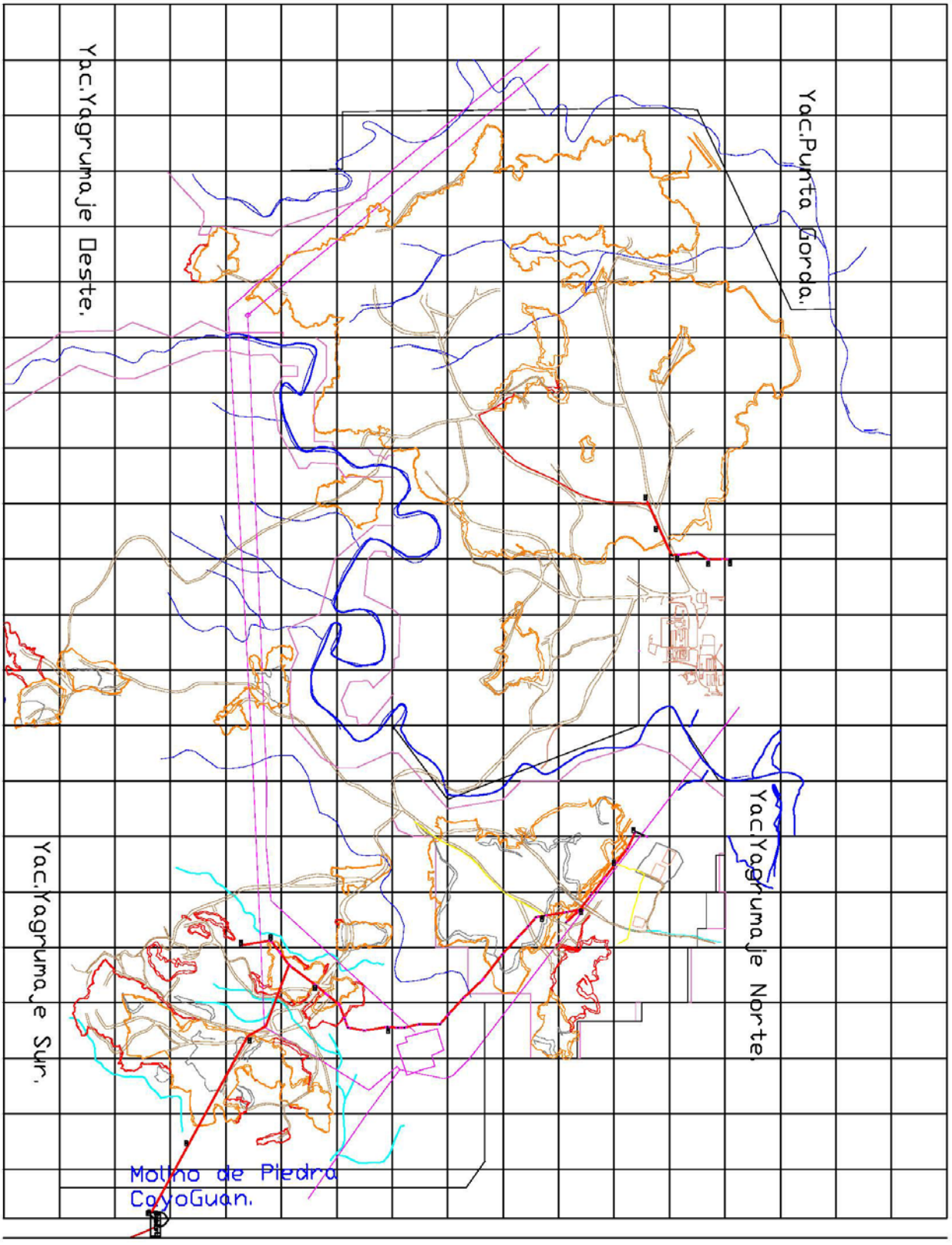
BIBLIOGRAFÍA.

1. **ALMIRALL, J. 2004**: *Temas de Ingeniería Eléctrica*. Félix Varela, La Habana, Cuba.
2. **ALVARO, A. D. R. 2007**: Estudio de un caso de protecciones de línea aérea con descargadores. In.
3. **ANSIC62.22**. **1999**: Guía para la aplicación de pararrayos de óxido metálico para sistemas de corriente alterna. In.
4. **BATISTA, G.** Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Cdte. Ernesto Che Guevara., 2011.
5. **CARABALLO, J., G;FERNÁNDEZ, JC**. Evaluación de la tasa de salidas por descargas atmosféricas de la línea Sna Gerónimo Arenosa a 765 kV. 2009.
6. **CARPENTER, R. B. 2008**: Requisitos de aterrizaje para protección contra descargas eléctricas atmosféricas. In. Colorado, USA.
7. **CARPENTER, R. B. & M. M. DRABKIN**. **2003**. Sistemas de protecciones para edificios contra voltajes anómalos inducidos externamente. In *Proceedings of*, Colorado, USA2003, 12.
8. **CONTE, M.** Propuesta de un sistema de protecciones contra descargas atmosféricas en la unidad básica minera de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Tesis, 2008.
9. **CONTRERAS, M. D.** Uso de los pararrayos con cuerno de arqueo en circuitos de distribución en el departamento de escuitla para mejorar la continuidad del servicio eléctrico. Tesis, 2003.
10. **DÍAS, J. 2005**: Consideraciones sobre el comportamiento de las líneas de distribución ante descargas atmosféricas. In. Sabaneta, Colombia, p. 6.
11. **DOMMEL, H. W. 1986.**: *Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory*
12. *Book)* Bonneville Power Administration, Portland.
13. **ERIKSSON, A. J. 1987**: The Incidence of Lightning Strikes to Power Lines. In *IEEE.*
14. **ESPINOSA, R. 2005**: *Sistemas de Distribución*. Noriega Limusa, Colombia.
15. **ESPINOSA, V. Y. 2009**: Protección contra descargas atmosféricas en el circuito: “6220 Menéndez – La Playa” de la provincia de Las Tunas. In.
16. **FULCHIRON, D. 1994**: Sobretensiones y Coordinación de aislamiento. In. Barcelona, p. 29.
17. **GÓMEZ, H. V., ESTEVAN**. **2006**: Respuesta transitoria de las puestas a tierra en la protección contra rayos. In *Revista Facultad de ingeniería.* Medellin, Colombia, vol. 36.
18. **GRAINGER, J. J. & S. WILIAN**. **2001**: *Análisis de Sistemas de Potencia*. McGRAW-HILLIINTERAMERICANA DE MEXICO, S. A. de C. V., Mexico.
19. **GROSO, O. O. 2007**: Línea eléctrica de media tensión In.
20. **GRZYBOWSKI, S. 1992**: Effectiveness of Dissipators Used for Lightning Protection on 115 kV Distribution Lines. In.
21. **HASSE, P. 2002**: Surge Protective Devices (SPDs) for Power Supply Systems and for Information Technology Systems. In. Habana, p. 43.
22. **HERMOSO, B. 1998**: Riesgos por impactos de rayos en las instalaciones eléctricas, montajes e instalaciones. In. España.

23. **HERNANDEZ, A. 2012**. Corrección del sistema de protecciones contra descargas atmosféricas en la línea aérea de media tensión de la mina de la empresa Ernesto Che Guevara. 69.
24. **HERRERA, R. 2006**: Sobretensiones y coordinación de aislamiento. In.
25. **IEEE C62.11**. **2005**: Standar for Metal-Oxide Surge Arreste for AC Power Circuits. In.
26. **IIE**. **2008**. Protección contra descargas atmosféricas. Buenos Aires.
27. **KUWABARA, N., T. TOMINAGA, M. KUNAZAWA & S. KURAMOT**. **2000**: Probability Ocurrence of Estimated Lightningg Surge Current at Lightning Rod before and after Installing dissipation Array System. In. Tokyo, p. 8.
28. **LÓPEZ, G.** Metodología para la aplicación de apartararrayos en líneas de transmisión para mejorar su confiabiliad. Instituto Politécnico Naconal, 2003.
29. **MEJÍA, A. 2005**: Carácterística de las descargas atmosféricas y su efécto sobre las líneas de transmisión. In. Sabaneta, Colombia.
30. **MOCKEY, I. O. 2002**: Protección Contra las Descargas Atmosférica. In. Santiago de Cuba, p. 51.
31. **MOCKEY, I. O. & D. BARRERO**. **2002**: Puesta a Tierra. In. Santiago de Cuba.
32. **MOLINA, J. 2002**. Sistemas modernos de protección contra descargas atmosféricas. Caracas
33. **NC**. **1987**: Protección contra las descargas eléctricas atmosféricas. In. Cuba.
34. **NOA, A.** Propuesta de diseño para soterrar las líneas eléctricas de las excavadoras de la mina en la Empresa Ernesto Che Guevara. Tesis, 2012.
35. **RAMÍREZ, S. 2009**: *Redes de Distribución de Energía*. Bobota.
36. **RICARDO , M. C.** Sobretensiones en sistemas eléctricos de potencia con sus neutros aislados. Tesis, 2005.
37. **RISON, W. 2004**: There is no Magic to Lightning Protection, Charge transfer System do no Prevent Lightning Strikes. In. New Mexico, p. 4.
38. **RODRÍGUEZ, A. 2006**: http://www.pararrayos.org/RayosNo.gracias. In.
39. **SILVA, S. 2003**. Opinión sobre los Sistemas de Transferencia de Carga. Caracas.
40. **SOTO, M. T., WILMAN**. Programa digital para el estudio y simulación del cálculo de fallas por apantallamiento y flameo inverso en líneas de transmisión. 2006.
41. **TORRES, H. 2002**: EL “DISSIPATION ARRAY SYSTEM”. In. Bogotá.
42. **TORRES, O. E. 2011a**. Curso de protecciones Eléctricas. In *Proceedings of*, Havana2011a.
43. **TORRES, O. E. 2011b**. Protección de transformadores utilizando descargadores valvulares. In *Proceedings of*, La Habana, Cuba2011b.
44. **TURRUBIATES, V. 2008**. Selección y aplicación de apartarrayos
45. **VÁSQUEZ, K. S. & L. RUALES**. cálculo de sobrevoltages originados por descarga atmosféricas en líneas de transmisión utilizano el ATP aplicado a la línea Santa Rosa-pomasqui a 230 kV. 2005.
46. **WWW.LECMEX.COM. 2005**: Un nuevo enfoque a las protecciones contra descargas eléctricas atmosféricas para líneas de trasmisión y distribución. In. mexico.
47. **YUGCHA, F.** Cálculo del comportamiento de una línea de transmisión frente al flameo inverso basado en el método montecarlo. Tesis, 2010.

48. **ZAPATA, F. A.** Análisis al blindaje e implementación del sistema de puesta a tierra denominado contraantenas en la línea de 69 kV Pantaleón-Cocales para reducir el índice de fallas por descargas atmosféricas. 2006.
49. **ZIPSE, D. 2002**: Prevent Lightning Strikes with Charge Transfer Systems. In.

ANEXO 1


Yac.Yagrumaje Oeste.
Yac.Punta Gorda.
Yac.Yagrumaje Sur.
YacYagrumaje Norte.
Molino de Piedra
CayoGuan.