



REPUBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ
FACULTAD DE METALURGIA ELECTROMECHANICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA

TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCION AL TITULO DE INGENIERO ELECTRICO

TEMA: Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Cdte. Ernesto Che Guevara.

AUTOR: Giorki Batista Abreu.

TUTORES: Ing. Adol Hernández Rojas.

Ing. Agustín Carcassés Carcassés.

Ing. Julián Noa Domínguez.

Moa-2011

Año 53 de la Revolución.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Declaración de Autoridad.

Giorki Batista Abreu, autor de este trabajo de diploma titulado: Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Cdte. Ernesto Che Guevara, certifica su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez, el cual podrá hacer uso del mismo para fines docentes y educativos.

Giorki Batista Abreu
(Diplomante)

Ing. Adol Hernández Rojas
(Tutor)

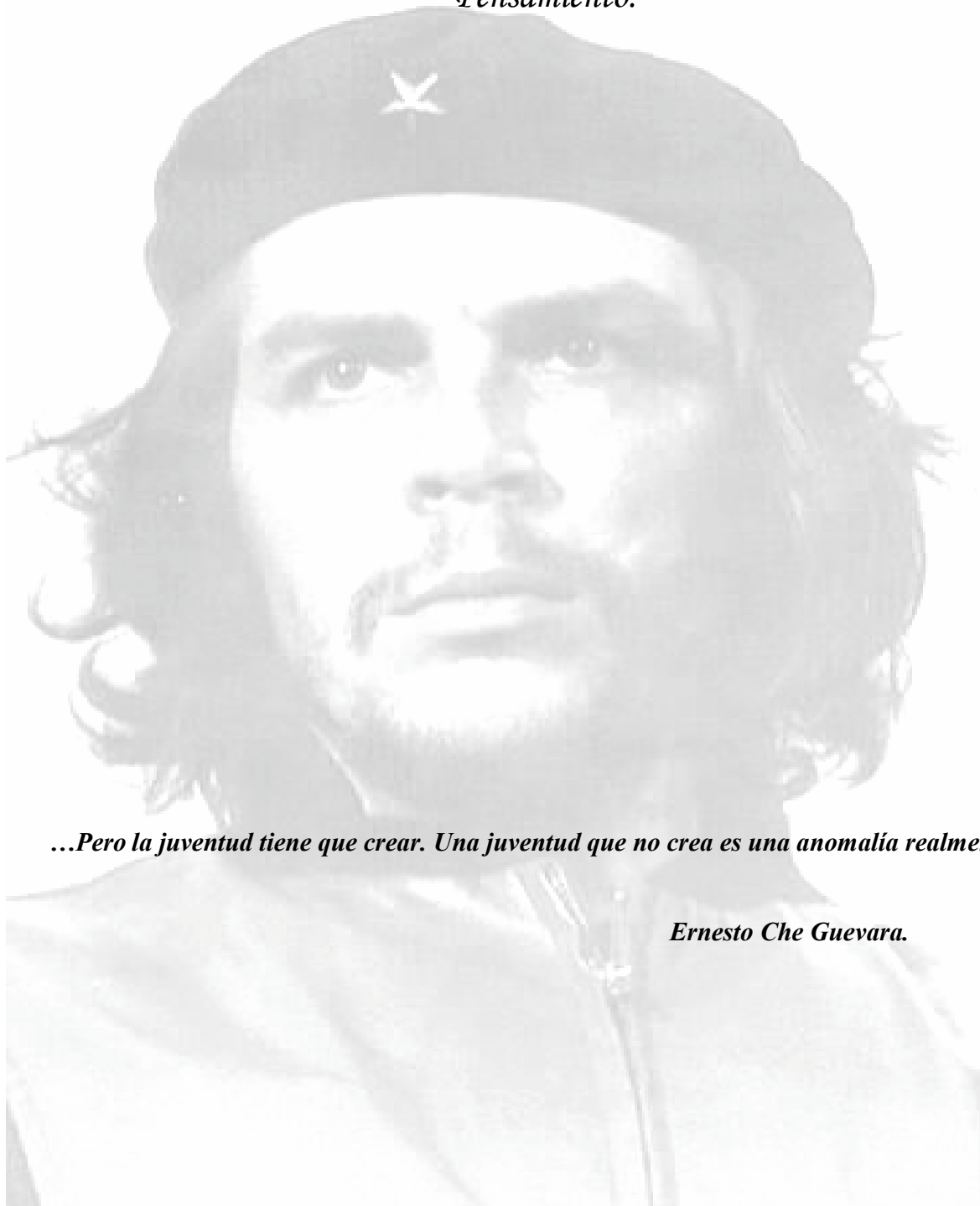
Ing. Agustín Carcassés Carcassés.
(Tutor)

Ing. Julián Noa Domínguez.
(Tutor)



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Pensamiento.



...Pero la juventud tiene que crear. Una juventud que no crea es una anomalía realmente...

Ernesto Che Guevara.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Agradecimiento.

A mi madre y su compañero Aleido, por su amistad, cariño y comprensión durante todo este tiempo.

A mi padre y su compañera Yanelis, que desde la distancia me dieron su apoyo.

A toda mi familia que siempre confiaron y me apoyaron en todo lo que necesité.

A mis amigos que siempre me alentaron a seguir y de los que no faltaron frases de aliento.

A los amigos que desde muy cerca me ayudaron y alegraron mi paso por la universidad.

A mis tutores:

Adol Hernández Rojas por la ayuda que me brindó en este último período.

Agustín Carcassés Carcassés especialmente por estar en cada una de las horas de realización de este trabajo brindándome su ayuda incondicional.

Pero sobre todo a esta Revolución que me ha dado la posibilidad de formarme como revolucionario y futuro profesional.

Gracias.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Dedicatoria.

A mi madre Mariola y mi padre José Manuel por ser la razón de mi vida y por el amor que me ofrecen.

A mi hermana Maidelis y mis hermanos Gianni y Giobel, a quienes espero poder servirle de ejemplo.

A mi abuelo José Ramón porque siempre ha sido ejemplo en mi vida.

A toda mi familia por su incondicional apoyo.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Resumen.

Este trabajo de diploma está destinado a la mejora del sistema de protección contra descargas eléctricas en las líneas aéreas de la mina de la empresa Cdte. Ernesto Che Guevara. La propuesta esta realizada sobre la base de un estudio de los principales sistemas de protección utilizados en la actualidad, que prometen una mayor confiabilidad en el sistema de protección.

El primer capítulo, esta dedicado a los conocimientos generales del fenómeno del Rayo y todo lo que trae consigo, además de los diferentes sistemas de protección conocidos hasta el momento, desde los más antiguos a los más recientes.

El segundo capítulo, lo dedicamos al estudio del sistema actualmente en explotación, a la selección del sistema de protección a proponer y como será implementado.

En el tercer capítulo, realizamos el análisis económico del proyecto, teniendo en cuenta las afectaciones que las descargas atmosféricas han causado, dejando grandes pérdidas económicas por concepto de reparaciones y afectación a la producción.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Summary.

This diploma's work is destined to improvement of the protection system against lighting at air-lines mine of the company mayor Ernesto Che Guevara in Moa. The proposition is developed and based-on the study of the principals protection system used today at world level. This system based-on advanced technology promise more trustier protection against lighting.

The first Chapter is dedicated to whole knowledge around lighting phenomenon besides some protections systems disseminated now a day from the older one to latest one.

The second Chapter we dedicated to study the actual protection system and selection of the protection system to propose furthermore who to improve it.

In the third Chapter was analyzed the economics result's project having the statistics of no worked hours in different equipments as a consequence of lighting causing big economic losses.



Índice

Introducción General.	1
Capítulo I: Fundamento teórico sobre las descargas atmosféricas y sus protecciones.	4
Introducción.	4
1.1 Teoría sobre la formación de descargas atmosféricas.	4
1.2 Formación de las Nubes de Tormentas.	4
1.3 Origen de las descargas atmosféricas.	5
1.3.1 Originadas por nubes de tormentas.	5
1.4 Tipos de rayos.	7
1.5 Parámetros de las descargas eléctricas.	9
1.5.1 Corrientes eléctricas descargadas por un rayo.	9
1.6 Efectos de las descargas atmosféricas.	10
1.6.1 Efectos directos.	10
1.6.2 Efectos secundarios.	11
1.7 Las sobretensiones por descargas atmosféricas.	13
1.7.1 Descargas atmosféricas directas.	13
1.7.2 Descargas atmosféricas indirectas.	14
1.8 Propagación de las sobretensiones.	14
1.9 Protección contra Rayos y sobretensiones transitorias externas.	16
1.10 Protecciones Contra descargas atmosféricas.	17
1.10.1 Puntas simple Franklin (PSF).	17
1.10.2 Pararrayos con dispositivo de cebado (PDC).	19
1.10.3 El Hilo de Guarda.	20
1.10.4 Sistema de Arreglo de Disipación (DAS).	23
1.10.5 Pararrayos autovalvulares.	38
1.11 Sistemas de puesta a tierra (spat).	40
1.11.1 Finalidad de las puestas a tierra	41



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

1.11.2 Clasificación de las puestas a tierra.	41
1.11.3 Partes de que consta una puesta a tierra.	42
Conclusiones Parciales.	43
Capítulo II: Configuración del sistema de protección y selección del equipamiento necesario.	45
Introducción.	45
2.1 La línea aérea de la mina.	45
2.2 Descripción del sistema actual.	46
2.3 Selección de la nueva variante de protección contra descargas atmosféricas.	48
2.4 Implementación de la variante de protección seleccionada.	49
2.4.1 El método de Wenner de 4 Polos.	52
2.4.2 Calculo de la malla a tierra.	54
Conclusiones Parciales.	58
Capítulo III: Evaluación económica del sistema de protecciones.	60
Introducción.	60
3.1 Análisis económico.	60
3.1.1 Tiempo de Amortización.	62
Conclusiones Parciales.	64
Conclusiones Generales.	65
Recomendaciones.	66
Bibliografía.	67
Anexo 1	
Características de funcionamiento de los descargadores valvulares.	
Anexo 2	
Consideraciones Para el Diseño de una Puesta a Tierra	



Introducción General.

En la actualidad, es una indudable realidad los bruscos cambios climáticos que sufre nuestro planeta. Aparejado a esto es notable, entre otros fenómenos y desastres climatológicos, el aumento progresivo de las tormentas, así como 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. En total ello representa unas 45000 tormentas diarias y unos 9 millones de descargas atmosféricas cada día.

Cuba es un país tropical y por consiguiente las líneas aéreas de la mina en la fábrica Comandante Ernesto Che Guevara (ECG) se encuentra geográficamente situada en una región de alto nivel cerámico, por lo que es necesario considerar en estas, un sistema de protección contra descargas atmosféricas más eficiente que el actual.

En la fábrica se concibió como protección contra el impacto directo de las descargas eléctricas, sistema basado en puntas de Franklin, distribuido por toda su área mediante las torres de alumbrado, chimeneas y torres específicas para este fin. Recientemente fueron montados descargadores valvulares en diferentes exhausters de la planta de secaderos, la planta de hornos y en molinos de la planta de molienda.

En el caso de las líneas aéreas de la mina que son las encargadas de llevar la energía a las excavadoras, el sistema de protección contra descargas atmosféricas, se basa en el cable de guarda convencional, el cual, pudo haber cumplido 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 se ha demostrado que este sistema no protege eficazmente los diferentes equipos que de allí son alimentados, permitiendo además la ocurrencia de sobretensiones que logran penetrar hasta los motores de las plantas de secaderos, molinos y hornos.

El constante movimiento de las excavadoras en consecuencia del laboreo minero y su expansión a otros frentes de minería, trae como resultado que el sistema de protección actual no conste con los parámetros requerido para asegurar estas líneas contra descargas atmosféricas.

La necesidad del conocimiento de las deficiencias del sistema actual contra descargas eléctricas (Rayos), impone el análisis detallado de los diferentes sistemas de protección



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

implementados en el mundo en estos momentos, con el objetivo de aumentar la confiabilidad del sistema de distribución eléctrica de la mina. El estudio de las nuevas tecnologías muestra el mejor camino a seguir para la correcta configuración del sistema de protección en esta área.

Las sobretensiones originadas por el impacto directo de un rayo en las líneas de la mina, afectan a los diferentes equipos eléctricos de la planta de secaderos, que de alguna manera están asociadas a ellas por medio de las subestaciones 2SD y 3SD. Por lo que se debe analizar la selección de los descargadores valvulares.

Situación Problemática: La ineficiencia del sistema de protección contra descargas atmosféricas, actualmente en explotación, ha permitido importantes averías en el equipamiento eléctrico de la unidad básica Minera y de la planta de secaderos, trayendo consigo importantes afectaciones al proceso productivo y las pérdidas económicas que estas ocasionan.

Problema: La imposibilidad de las protecciones actualmente instaladas en la línea aérea de alimentación eléctrica de la mina en la ECG de eliminar las fallas por descargas atmosféricas.

Hipótesis: Si se realiza una correcta selección de un sistema de protección contra descargas atmosféricas se podrá eliminar las fallas por estas en la línea aérea de la mina y en los equipos asociados a ella.

Objeto de estudio: Las protecciones contra descargas atmosféricas en la línea de alimentación de la mina en la ECG.

Campo de acción: Las protecciones contra descargas atmosféricas.

Objetivo General: Configurar un sistema de protecciones contra descargas atmosféricas que disminuya las fallas en la línea aérea de la mina en la ECG.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Objetivos Específicos:

- Realizar un estudio bibliográfico sobre las descargas atmosféricas, los efectos que provocan en las líneas aéreas de transporte de energía eléctrica y los principales dispositivos de protección utilizados para suprimir sus efectos.
- Describir las características eléctricas, técnicas y constructivas de la línea de distribución de la mina en la ECG.
- Seleccionar y desarrollar la variante de protección contra descargas atmosféricas que más se ajuste a las características de la línea de distribución de la mina y que elimine el problema existente.

Resultados Esperados:

- Describir los diferentes tipos de rayos existentes y los dispositivos de protección en líneas aéreas contra este tipo de anomalías.
- Realizar el esquema monolineal de la línea aérea de alimentación de la mina y demostrar la importancia de eliminar las sobretensiones en la misma.
- Desarrollar y ajustar la variante de protección que mejor se ajuste a las condiciones de la línea aérea de alimentación de la mina.
- Demostrar que el sistema de protección propuesto es viable técnicamente.



Capítulo I: Fundamento teórico sobre las descargas atmosféricas y sus protecciones.

Introducción.

En la elaboración de un trabajo referente a las protecciones contra descargas atmosféricas, es de vital importancia el conocimiento sobre estos fenómenos. Por este motivo en este capítulo se efectúa de manera general un estudio de su formación y desarrollo, además de sus parámetros, efectos destructivos y beneficiosos. En el documento elaboramos una recopilación y análisis de los principales métodos de protección puestos en práctica en el mundo actual.

1.1 Teoría sobre la formación de descargas atmosféricas.

Una Descarga Atmosférica (rayo) no es más que una chispa eléctrica producida entre una nube cargada de electricidad y la tierra o entre dos nubes cargadas con electricidad de diferentes signos, cuando la diferencia de tensión entre una y otra crea un gradiente que el aire entre ambas no es capaz de soportar. El rayo puede producirse desde una nube a tierra (rayo descendente) o desde tierra hacia nube (rayo ascendente). La mayor parte de las descargas atmosféricas la constituyen los denominados rayos descendentes negativos: este tipo de descarga viene provocada por la diferencia entre la polaridad negativa de la nube y la polaridad positiva de la tierra. El rayo ascendente (negativo o positivo) se produce en la forma contraria.

1.2 Formación de las Nubes de Tormentas.

Ciertas condiciones atmosféricas, tales como altas temperaturas o humedad, llevan a las nubes de tormenta en formación. Estas enormes masas, nubes en forma de yunque son generalmente de la variedad cumulonimbus, la parte inferior está compuesta por gotas de agua, mientras que a mayor altitud se encuentran cristales de hielo.

La formación más común y a la que nos referimos de aquí en adelante, es aquella en que quedan mayoritariamente gotas de agua con carga negativa en la parte inferior de la nube, y cristales con carga positiva en la parte superior. En la parte inferior de la nube se forman



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

además pequeños bolsones de carga positiva. Esta distribución de cargas produce una concentración de carga positiva en la tierra bajo la nube (sombra eléctrica). A partir de ese momento puede comenzar una descarga atmosférica.

1.3 Origen de las descargas atmosféricas.

Las Tormentas Solares.

Durante las tormentas solares nuestro planeta está golpeado implacablemente por radiaciones ultravioletas, rayos X y torrentes de partículas cargadas, lo cual distorsiona el campo magnético e induce poderosas corrientes eléctricas a la atmósfera, este fenómeno se representa en tormentas eléctricas y mucha actividad de rayos positivos (tormentas secas) y en peligrosas auroras.

1.3.1 Originadas por nubes de tormentas.

La descarga atmosférica comienza con una descarga preliminar, producido por el campo eléctrico de alta intensidad ($10e^6$ V/m) que puede aparecer entre los bolsones de carga positiva y la carga negativa de la base de la nube, que producen una ionización en dicha zona, a partir de ese momento puede desencadenarse una descarga intra-nube o nube-tierra. Este fenómeno se percibe como una descarga luminosa ⁽¹⁵⁾.

Luego se desarrolla desde la nube a tierra una descarga de cierta luminosidad que avanza de a pasos estableciéndose un canal cargado negativamente que se acerca la tierra, es denominada líder escalonado. Para el 50% de los Rayos cada paso del líder tiene una longitud de aproximadamente 50m.

Cuando este líder se acerca a la tierra, el valor del campo eléctrico medio aumenta y se produce la ionización del aire principalmente en las puntas y aristas conductoras (efecto corona). Si en algún punto el valor del campo eléctrico llega a ser crítico (500kV/m) las cargas adquieren movilidad y se genera desde la tierra el trazador ascendente. Este trazador acerca el potencial de la nube al potencial de tierra; cuando se establece entre el punto del trazador y el líder escalonado el campo eléctrico correspondiente a la ruptura dieléctrica del aire, se produce la ruptura del último paso y se establece el camino de descarga.

Una vez producida la ruptura del último paso, se produce la transferencia de carga almacenada en el canal del líder escalonado y parte de la nube, este es el primer retorno.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

La intensidad de este primer retorno es para el 50% de los rayos mayor que 20kA, medidos en el punto de descarga de tierra.

Luego se reconstituye la carga de la nube y se produce una descarga de poca intensidad que reioniza el camino principal establecido por el primer retorno. Una vez reionizado el camino de descarga se produce una segunda descarga o segundo retorno.

Por último se produce el Dardo retorno este puede repetirse hasta 11 veces, y producirse una descarga con 11 dardos y 12 retornos. Existen diversos tipos de descargas, que difieren de la intensidad del primer retorno, cantidad de retornos sucesivos, polaridad (descargas positivas o negativas), tiempo de descarga, que se inicia desde la nube o desde la tierra, ect.

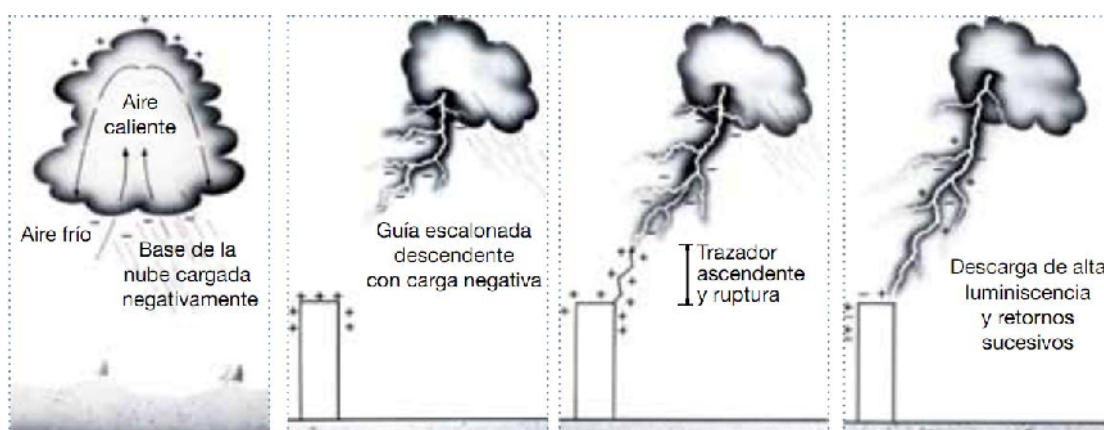


Figura (1) Etapas de una descarga atmosférica nube-tierra.

Las descargas eléctricas de origen atmosférico se producen de 4 diferentes maneras:

Dentro de una misma nube.

De una nube a otra.

De una nube al aire circundante.

De una nube a tierra.

Las tres primeras maneras de producirse las descargas tienen poca influencia sobre la superficie de la tierra, aunque si son una fuerte de preocupación para la aviación, pues se estima que un avión comercial recibe en promedio una descarga eléctrica de origen atmosférico por año. Las descargas de nube a tierra son las que normalmente nos preocupan por sus efectos destructivos.

Las descargas más estudiadas y de mayor frecuencia son las descargas negativas que se inician desde la nube.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Las descargas que se inician desde la tierra son menos frecuentes y se producen en lugares de mucha altura.

1.4 Tipos de rayos.

Algunos rayos presentan características particulares; los científicos y el público en general han dado nombres a estos diferentes tipos de rayos. El rayo que se observa más comúnmente es el rayo streak. Esto no es más que el trazo de retorno, la parte visible del trazo del rayo. La mayoría de los trazos se producen dentro de una nube, por lo que no vemos la mayoría de los trazos individuales de retorno durante una tormenta.

1.41 Rayo nube a tierra.

Es el más conocido y el segundo tipo más común. De todos los tipos de rayos, éste representa la mayor amenaza para la vida y la propiedad, puesto que impacta contra la tierra. El rayo nube a tierra es una descarga entre una nube cumulonimbus y la tierra. Comienza con un trazo inicial que se mueve desde la nube hacia abajo.

1.42 Rayo perla.

El Rayo perla es un tipo de rayo de nube a tierra que parece romper en una cadena de secciones cortas, brillantes, que duran más que una descarga habitual. Es relativamente raro. Se han propuesto varias teorías para explicarlo; una es que el observador ve porciones del final de canal de relámpago, y que estas partes parecen especialmente brillantes. Otra es que, en el rayo cordón, el ancho del canal varía; como el canal de relámpago se enfría y se desvanece, las secciones más amplias se enfrían más lentamente y permanecen aun visibles, pareciendo una cadena de perlas .

1.4.3 Rayo Staccato.

Rayo Staccato es un rayo de nube a tierra, con un trazo de corta duración que aparece como un único flash muy brillante y a menudo tiene ramificaciones considerables.

1.4.4 Rayo bifurcado.

Rayo bifurcado es un nombre, no uso formal, para rayos de nube a tierra que exhiben la ramificación de su ruta.



1.4.5 Rayo tierra a nube.

El rayo tierra a nube es una descarga entre la tierra y una nube cumulonimbus, que es iniciado por un trazo inicial ascendente, es mucho más raro que el rayo nube a tierra. Éste tipo de rayo se forma cuando iones cargados negativamente, se elevan desde el suelo y se encuentran con iones cargados positivamente en una nube cumulonimbus. Entonces el rayo vuelve a tierra como trazo de retorno.

1.4.6 Rayo nube a nube.

Este tipo de rayos pueden producirse entre las zonas de nube que no estén en contacto con el suelo. Cuando ocurre entre dos nubes separadas; es llamado rayo inter-nube y cuando se produce entre zonas de diferente potencial eléctrico, dentro de una sola nube, se denomina rayo intra-nube. Este es el tipo que ocurre con más frecuencia.

Las descargas que nos interesan por su efecto, son los de nube a tierra, y en éstos se pueden encontrar 4 tipos: 2 iniciados en las nubes, y 2 iniciados en tierra, ya que pueden ser positivos o negativos. Los más comunes, siendo el 90 % de los rayos detectados, son de una nube negativa hacia tierra.

Los rayos de polaridad positiva tienen un considerable interés práctico porque tanto, la corriente pico como la carga total transferida pueden ser mucho más grandes que las de la mayoría de los rayos con polaridad negativa más comunes. La información archivada sobre elevados picos de corriente, en el rango de 200 a 300 kA, proviene de rayos positivos.

Los rayos positivos contienen normalmente una única descarga de retorno seguida de un período de corriente continua. La mayoría de rayos positivos a tierra ocurren durante las tormentas de invierno, aunque estas tormentas producen pocos rayos en general, y es relativamente raro que ocurran en tormentas de verano, no más de un 15 % de los rayos, aunque tormentas con carga predominantemente negativa acaban a menudo con descargas positivas. El porcentaje de descargas positivas en tormentas de verano aparentemente se incrementan con un aumento de la latitud geográfica y con un aumento de la altura del terreno, es decir, cuanto más cerca está la carga de la nube de la tierra



mayor probabilidad de que ocurran descargas positivas, aunque en la actualidad no se tiene suficientemente conocimiento sobre descargas positivas como para decir que esto es siempre una condición necesaria.

1.5 Parámetros de las descargas eléctricas.

Los diferentes estudios y pruebas de campo nos permiten conocer algunos datos acerca del rayo: La temperatura máxima de un rayo puede alcanzar valores aproximados a 30.000 °C, con una duración de aproximadamente una millonésima de segundo. El diámetro de la descarga visible del rayo (canal ionizado) es del orden de 1,5 centímetros. La longitud de la descarga vertical es normalmente de 5 a 7 Km. El valor pico de corriente puede llegar a ser de 300.000 amperes. 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 ^[15].

1.5.1 Corrientes eléctricas descargadas por un rayo.

Las corrientes que circulan durante las sucesivas descargas de retorno de un rayo, son muy intensas, tienen muy corta duración y su forma de onda muestra inicialmente un crecimiento muy empinado hasta alcanzar su pico máximo, seguido de un decrecimiento más lento. Las descargas atmosféricas son un evento estadístico, por lo tanto los valores de las magnitudes que las caracterizan están siempre asociados a una probabilidad de ocurrencia. En los rayos con múltiples descargas, la primera es la que drena la mayor corriente, siendo las siguientes de menor intensidad. De acuerdo con la distribución de frecuencias de las corrientes de pico de las descargas eléctricas atmosféricas realizadas por distintos investigadores, la primera descarga de retorno tiene las siguientes características:

El 2 % tiene un pico de más de 140 kA.

El 10 % tiene un pico de más de 65 kA.

El 50 % tiene un pico de más de 18 kA.

El 90 % tiene un pico de más de 6,2 kA.

El 98 % tiene un pico de más de 3,1 kA.

Las descargas siguientes tienen un pico de aproximadamente la mitad de los valores de la primera. El pulso de corriente de una descarga tiene un rápido crecimiento inicial y en un



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

tiempo del orden de unos pocos microsegundos llega a su máximo. Luego comienza a decrecer, y en unos 120 microsegundos transcurridos desde su inicio, la descarga cesa. 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 que aparecen en los cuerpos alcanzados por una descarga son elevadísimas pues aunque sólo se interpongan en su camino impedancias muy bajas, las elevadas corrientes del orden de los kA, producen caídas de tensión del orden de decenas o centenares de kV.

1.6 Efectos de las descargas atmosféricas.

El rayo, a niveles no tan masivos como en una tormenta eléctrica, pudo haber jugado un papel fundamental en la creación de la vida en La Tierra. Harold Urey, Premio Nobel de Química en 1934, propuso que la tierra estaba formada inicialmente por amonio, hidrógeno, metano y vapor de agua. Stanley Miller, uno de sus alumnos, creó experimentalmente en 1950 un ambiente conformado sólo con los elementos mencionados. Pero le agregó una chispa eléctrica para iluminarlo y descubrió que, habiéndose previamente cerciorado de que ninguna estructura viva había en el ambiente por él diseñado, después de una semana encontró que se habían formado aminoácidos, los componentes de las proteínas.

Además las millonarias descargas que se efectúan en un año convierten el rayo en el principal regulador del balance calorífico del planeta, aparte de ser un gran fijador del Nitrógeno en el suelo, necesario para la vida vegetal y un recuperador del Ozono en el aire.

Pero las descargas atmosféricas también tienen efectos negativos ya que son responsables y principal generador de disturbios electromagnéticos.

1.6.1 Efectos directos.

El impacto directo de un rayo en la instalación a proteger provoca daños físicos como incendios y deterioros en la construcción que pueden ser importantes. Los desperfectos que ocasiona en la instalación son enormes y puede llegar a provocar la destrucción de consumidores eléctricos, electrónicos, y pérdidas de vidas humanas.



1.6.2 Efectos secundarios.

Los efectos secundarios de un impacto de rayo directo o cercano a una instalación indican que los efectos secundarios, son la causa de la mayoría de los incendios reportados actualmente en instalaciones. ^[2] Hay cuatro diferentes efectos secundarios que acompañan una descarga. Estos son:

- Pulsos Electromagnéticos (EMP).
- Pulsos Electrostáticos.
- Corrientes Transitorias de Tierra.
- Carga Electroestática.

Pulsos Electromagnéticos (EMP).

Los pulsos electromagnéticos, son el resultado de los campos electromagnéticos transitorios que se forman por el flujo de corriente, a través del canal de descarga del rayo. Después de que se establece el canal de descarga del rayo entre la nube y la tierra, llega a formarse un camino tan conductivo como un conductor eléctrico. La corriente de neutralización comienza a fluir rápidamente, en relación directa con la impedancia en el canal de descarga y la carga eléctrica de la nube de tormenta. La relación de crecimiento de estos pulsos de corriente, varía en órdenes de magnitud. Ellos han sido medidos en niveles por encima de 510 kA por microsegundo. Un promedio práctico, podría ser de 100 kA por microsegundo. ^{[2] [15]}

Las corrientes que fluyen a través de un conductor, producen un campo magnético en relación a las mismas. Ya que estas corrientes de descarga crecen rápidamente y alcanzan corrientes pico de cientos de miles de amperes, los pulsos magnéticos que ellos crean pueden ser muy significativos. El voltaje inducido resultante (EMP) dentro de cualquier grupo donde existen varios cables que corren paralelamente, puede también ser muy significativo.

Un descomunal aumento de carga acompaña al rayo de retorno, la cual actúa como una gigantesca antena de onda viajera, generando potentes ondas de pulsos electromagnéticos. Por lo que, los EMP de una descarga eléctrica atmosférica, pueden propagarse a grandes distancias y afectar grandes áreas. Los EMP de un rayo, tienen un amplio espectro y la mayor parte de su energía está en la banda de baja frecuencia. De ahí que, puedan penetrar el blindaje y causar interferencias en el sistema.



Pulsos Electrostáticos

Los transitorios atmosféricos o pulsos electrostáticos, son el resultado directo de la variación del campo electrostático que acompaña a una tormenta eléctrica. Cualquier conductor suspendido sobre la superficie de la tierra, está inmerso dentro de un campo electrostático y será cargado con un potencial en relación a su altura (i.e. tantas veces la altura por la intensidad del campo), sobre la superficie de la tierra. Por ejemplo, una línea de distribución o telefónica aérea, a una altura promedio de 10 metros sobre la tierra, en un campo electrostático medio, durante una tormenta eléctrica, se cargará con un potencial de entre 100 kV y 300 kV con respecto a la tierra. Cuando ocurre la descarga (rayo), esa carga deberá moverse hacia abajo en una línea, buscando un camino a la superficie de la tierra. Cualquier equipo conectado a esa línea, proveerá el camino hacia la tierra. A menos que ese camino esté protegido adecuadamente, será destruido durante el proceso de la descarga a tierra para neutralizarse. Este fenómeno es conocido como transitorio atmosférico inducido. La elevación y caída de voltaje electrostático, también está relacionado con los pulsos electrostáticos (ESP).^[15]

Una estructura metálica vertical inmersa en estos campos electrostáticos, especialmente, aquellas que terminan en forma de punta, tienen una considerable diferencia de potencial con respecto a la tierra. Si la estructura no está aterrizada, puede causar arcos eléctricos y en algunos lugares con clasificación de alto riesgo, puede iniciarse un incendio o bien, alterar el funcionamiento o incluso dañar al equipo electrónico, generalmente, muy sensible.

Corrientes de Tierra.

La corriente transitoria de tierra es el resultado directo del proceso de neutralización que sigue a un impacto de rayo. El proceso de neutralización, es consumado por el movimiento de la carga a lo largo o cerca de la superficie de la tierra, desde el punto donde se induce la carga, hasta el punto donde termina el rayo. Cualquier conductor enterrado o cercano a esa carga, proveerá un camino más conductivo desde el punto donde se inicia, al punto donde termina el rayo. Esto induce un voltaje en relación con la carga, que se maneja en esos conductores, lo cual otra vez está relacionado con la cercanía a donde el rayo se impactó^{[2] [15]} A este voltaje inducido se le llama “corriente transitoria de tierra” y aparece en alambres conductores, tuberías y otras formas de conductores. Si los conductores



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

están blindados, los alambres internos experimentarán la primera inducción de la corriente que fluye por el blindaje. Aunque el proceso de descarga es muy rápido (20 microsegundos) y la relación de crecimiento al pico es tan pequeña como 50 nanosegundos, el voltaje inducido será muy alto.

La terminación de un rayo de retorno en la tierra puede causar los efectos siguientes:

Puede causar arqueos a través de la tierra a tuberías de gas adyacentes, cables o sistemas de tierra. (Normalmente se considera un gradiente de ruptura de 50 kV/m).

La corriente de sobrecarga, puede correr por la tierra paralelo al sistema de tierras electrónico existente, lo cual originará una distribución de elevación de potencial de tierra no uniforme (GPR) en el sistema de tierra. .

Carga electrostática.

Debido a la ionización del medio por donde pasa el canal guía, induce una carga estática en cualquier estructura inmersa en la tormenta y una diferencia de potencial en la estructura o conductor respecto a tierra (falla de sobretensión); la cual producen arcos secundarios en conductores eléctricos e interferencias.

La protección contra rayos convencional no puede prevenir la Carga Estática o Arcos Secundarios, porque no hay un camino de descarga confiable y disponible.

1.7 Las sobretensiones por descargas atmosféricas.

Estas son la razón de este trabajo, la descarga de un rayo resulta en la generación de enormes sobretensiones que según la forma en que se manifieste la agresión de la descarga, producirá menor o mayor daño. Esta descarga puede causar incendios, destrucción de maquinaria e incluso muertes de personas.

Las causas de estas sobretensiones son las siguientes:

1.7.1 Descargas atmosféricas directas.

Esta ocurre cuando la descarga cae directamente en la línea. En este caso, la línea recibe bruscamente una tensión muy elevada, con lo que pueden producirse descargas a tierra a través de los postes o del cable de guarda, si se instala este elemento de protección.



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 ^[15] ^[13]

1.7.2 Descargas atmosféricas indirectas.

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

De acuerdo con investigaciones realizadas, se ha encontrado que cerca del 80% de los daños en líneas de distribución, son producidos por este mecanismo. Así pues, las descargas indirectas constituyen la principal causa de daños por descargas atmosféricas, no solo en líneas de distribución sino en instalaciones domiciliarias y de computadores ^[14],^[13].

1.8 Propagación de las sobretensiones.

Acoplamiento galvánico: por medio de las impedancias comunes se acoplan sobretensiones galvánicamente desde una lugar hacia otro. Las altas amplitudes de corrientes de rayo causan una sobretensión a través de la resistencia de tierra de una conexión equipotencial entre dos aparatos conectados.

En los conductores que pasa una corriente de rayo se genera adicionalmente una sobretensión, que a causa de la gran velocidad de aumento de corriente se puede atribuir, según la ley $U_L = X_L \cdot di/dt$, esencialmente a la componente inductiva ^[15]. Ver fig.(2)

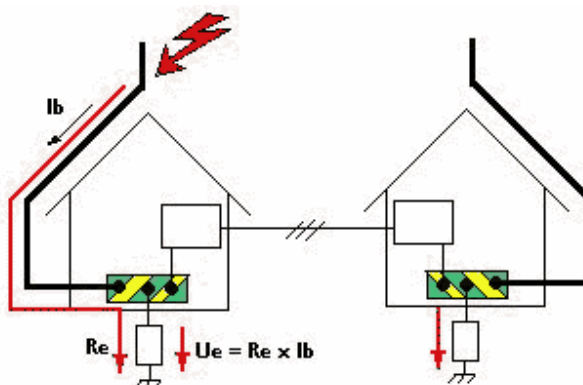


Figura (2) Acoplamiento galvánico.



Acoplamiento inductivo: el acoplamiento inductivo en una línea tiene lugar a través del campo magnético según el principio del transformador. Una sobretensión provoca una corriente transitoria en un conductor con una alta velocidad de aumento de la di/dt . Al mismo tiempo, alrededor de este conductor se genera un campo magnético (función del primario de un transformador). En conductores aledaños que se encuentran en la zona activa del campo magnético, se induce una sobretensión ^[15] (función del secundario de un transformador). Ver fig.(3)

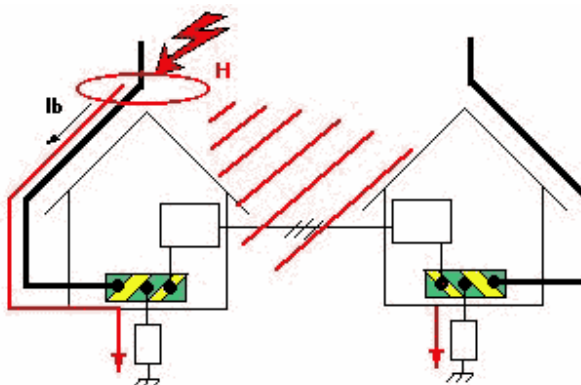


Figura (3) Acoplamiento inductivo.

Acoplamiento capacitivo: el acoplamiento capacitivo tiene lugar, en principio, a través del campo eléctrico entre dos puntos con gran diferencia de potencial. Una parte o un aparato eléctricamente conductor [1] es puesto a un alto potencial debido a la descarga de un rayo, por ejemplo, la barra colectora de un pararrayos. Se genera un campo eléctrico entre [1] y otras partes con potencial inferior [2], por ejemplo. Una línea de alimentación o de transmisión de señales dentro del edificio. La tensión entre [1] y [2] tiende a igualarse lo que conduce al transporte de una carga. Esto aporta un ascenso de tensión en la línea afectada [2] y en el aparato conectado a ésta ^[5]. Ver fig.(4).

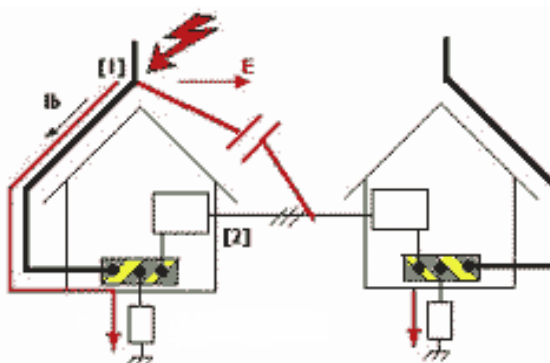


Figura (4) Acoplamiento capacitivo.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

1.9 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. 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 pararrayos y presentó la llamada teoría del fluido único para explicar los dos tipos de electricidad atmosférica, la positiva y negativa. Desde entonces el pararrayos tipo Franklin no ha evolucionado.

Todos los pararrayos que acaban en una o varias puntas tienen como principio la excitación y captación del rayo. En mayor o menor grado generan efectos secundarios de contaminación electrostática y electromagnética que afectan con la posible destrucción a las instalaciones y equipos eléctricos, por ese motivo los fabricantes de pararrayos recomiendan protecciones suplementarias en las instalaciones internas para minimizar los efectos de la subida de tensión temporal (sobretensión) en los equipos eléctricos.

1.9.1 Protección exterior contra descargas atmosféricas.

Es la conocida vulgarmente como protección primaria: tiene la finalidad de proteger a la construcción: vivienda, edificio, fabrica, torres de comunicaciones, etc. Ante el impacto directo del rayo. ^[3]

Un sistema de protección exterior aporta protección a la edificación o construcción pero no supone protección para las instalaciones internas (eléctricas, telefónicas de computación, de telemetría, de instrumentación, etc.).

La protección exterior es una medida necesaria pero no suficiente ^[3] . La normativa vigente sobre esta especialidad defiende un concepto de protección integral que incluye medidas de protección exterior y medidas de protección interior contra descargas atmosféricas.

En la actualidad existen una variedad de mecanismos y sistemas de protección exteriores ante la agresión directa del rayo.



1.10 Protecciones Contra descargas atmosféricas.

1.10.1 Puntas simple Franklin (PSF).

Son electrodos de acero o de materiales similares acabados en una o varias puntas, denominados Punta simple Franklin ver Fig.(5), no tienen ningún dispositivo electrónico ni fuente radioactiva. Su medida varía en función del modelo de cada fabricante, algunos fabricantes colocan un sistema metálico cerca de la punta para generar un efecto de condensador. ^{[12] [10]}



Figura (5) Sistema pararrayo Punta Franklin

Durante el proceso de la tormenta se generan campos eléctricos de alta tensión entre nube y tierra. Ver fig.(6) y (7). Las cargas se concentran en las puntas más predominantes a partir de una magnitud del campo eléctrico. Alrededor de la punta o electrodo aparece la ionización natural o efecto corona, resultado de la transferencia de energía. Este fenómeno es el principio de excitación para trazar un canal conductor que facilitará la descarga del fenómeno rayo (Leader).

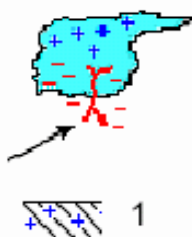


Figura (6) Campo eléctrico de alta tensión entre nube y tierra.

En función de la transferencia o intercambio de cargas, se pueden apreciar, en la punta del pararrayos, chispas diminutas en forma de luz, ruido audible a frito, radiofrecuencia,



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

vibraciones del conductor, ozono y otros compuestos (efecto corona). Este fenómeno arranca una serie de avalancha electrónica por el efecto campo, un electrón ioniza un átomo produciendo un segundo electrón, éste a su vez junto con el electrón original puede ionizar otros átomos produciendo así una avalancha que aumenta exponencialmente. Las colisiones no resultantes en un nuevo electrón provocan una excitación que deriva en el fenómeno luminoso. A partir de ese momento, el aire cambia de características gaseosas al límite de su ruptura dieléctrica (Trazador o canal ionizado) ver figura (9).

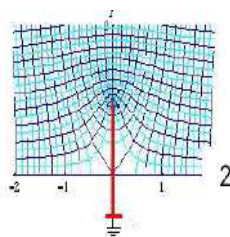


Figura (7) Campo eléctrico de alta tensión.

El rayo que es el resultado de la saturación de cargas entre nube y tierra, se encarga de transferir en un instante, parte de la energía acumulada; el proceso puede repetirse varias veces.

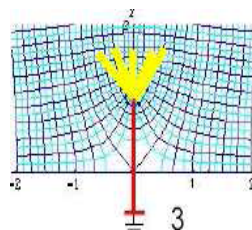


Figura (8) Efecto corona en la transferencia de cargas.

El objetivo de estos pararrayos atrae-rayos es proteger las instalaciones del impacto directo del rayo, excitando su carga y capturando su impacto para conducir su potencial de alta tensión a la toma de tierra eléctrica.

Se conocen casos en los que parte del pararrayos ha desaparecido a causa del impacto, que superó los 200.000 Amperios. Algunos estudios demuestran que estos equipos no son eficaces.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

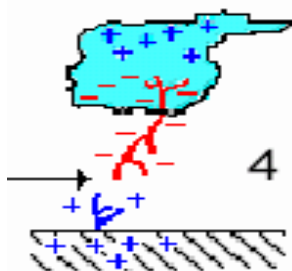


Figura (9) Ruptura dieléctrica del aire.

1.10.2 Pararrayos con dispositivo de cebado (PDC).

Están formados por electrodos de acero o de materiales similares acabados en una punta. Incorporan un sistema electrónico que genera un avance teórico del trazador; otros incorporan un sistema piezoeléctrico que genera un efecto similar. Los dos sistemas se caracterizan por anticiparse en el tiempo en la captura del rayo, una vez que se produce la carga del dispositivo electrónico de excitación (cebador). Las medidas de los cabezales varían en función del modelo de cada fabricante. No incorporan ninguna fuente radioactiva.

El principio de funcionamiento sigue siendo el mismo que los pararrayos tipo Franklin, la diferencia tecnológica de estos equipos está en el sistema electrónico, que aprovecha la influencia eléctrica del aumento de potencial entre la nube y la tierra para autoalimentar el cebador. Son componentes electrónicos que están alojados normalmente en el interior de un envase metálico y colocado en la parte más cercana de la punta del pararrayos y sirve para excitar la avalancha de electrones (ionización). La excitación del rayo se efectúa ionizando el aire por impulsos repetitivos. Según aumente gradualmente la diferencia de potencial entre el pararrayos y la nube, aparece la ionización natural o efecto corona. Son mini descargas que salen de la punta con más intensidad para ionizar el aire más lejos; este fenómeno es el principio de excitación para trazar un camino conductor intermitente que facilitará la descarga del fenómeno rayo.

El dispositivo electrónico de cebado del PDC está conectado en serie entre el cabezal aéreo y la punta. Sólo funciona con rayos negativos. El sistema de cebado necesita un



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

campo eléctrico de alta tensión polarizado y un tiempo de carga para activar su dispositivo electrónico. Éste generará un impulso de cebado intermitente mientras exista el aporte de energía natural. Este tiempo de carga del dispositivo electrónico de cebado no se contabiliza en los ensayos de laboratorio de alta tensión para la homologación de un PDC. En el campo de aplicación, el dispositivo electrónico de cebado instalado en la punta del PDC necesita un tiempo de trabajo y una polarización estable del campo eléctrico para efectuar la primera carga del sistema electrónico de cebado. Durante ese proceso, el efecto de ionización se retrasa en la punta del PDC referente a los sistemas convencionales de pararrayos en punta tipo Franklin. El dispositivo de cebado está formado por pequeños componentes electrónicos sensibles a los campos electromagnéticos, compuesto de: diodos, bobinas, resistencias y condensadores aislados entre sí por una resina. Este dispositivo se encuentra instalado en el cabezal aéreo (PDC). El conjunto está dentro de la influencia directa de los efectos térmicos, electrodinámicos y electromagnéticos que genera el impacto del rayo durante la descarga. En función de la intensidad de descarga del rayo, la destrucción del dispositivo electrónico es irreversible. A partir de ese momento, la eficacia del PDC no está garantizada.

Según estudios realizados, el conjunto de la instalación, no garantiza la protección de las personas, animales e instalaciones. El radio de acción de estos pararrayos PDC ha sido reducido en un 40 %, después del estudio efectuado por organizaciones francesas, si se modifican los campos de cobertura de los pararrayos PDC, por falta de fiabilidad mostrará que los sistemas Franklin no son fiables tampoco, por ser la misma tecnología y el principio de funcionamiento para los dos.

1.10.3 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 de esta forma comprender sus ventajas y desventajas.

Estamos refiriéndonos a un cable aéreo ver figura (10) tendido entre mástiles, es 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



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

una punta simple. [5] Este dispositivo es extensamente usado por las empresas que suministran energía eléctrica, en sus estaciones y subestaciones de transformación exteriores y líneas de transmisión. También son utilizados para proteger estructuras que contienen inflamables o explosivos.

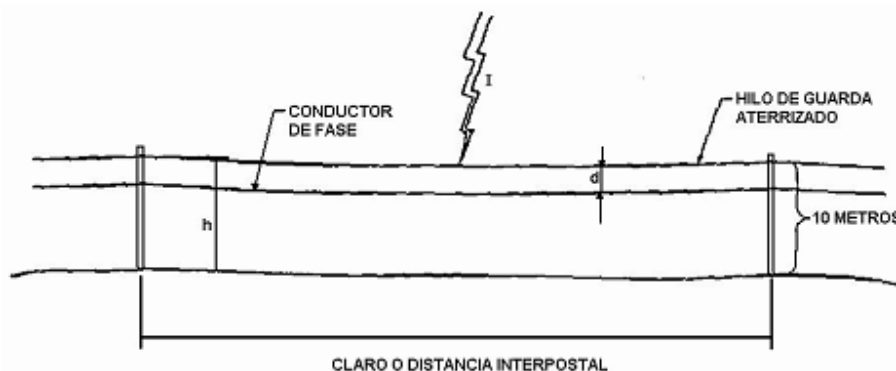


Figura (10) Protección con Hilo de Guarda.

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. La figura (11) ilustra este concepto. 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. [5] [7]

En líneas de distribución 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 30° , el factor de acople es aún suficiente para que una descarga promedio produzca flameo. Esta conclusión se puede ilustrar como sigue:

La tensión inducida en el cable de guarda, el cual tiene una impedancia característica cercana a 500Ω , para una descarga promedio, es aproximadamente: 7500 KV ($30 \text{ KA} \times 500/2 \Omega$), con lo cual la inducción en el conductor de fase será del orden de 750 KV con un factor de acople de 0.1, haciendo inminente el flameo a tierra en el conductor de fase. Cabe anotar aquí, que en esta estimación no se tuvieron en cuenta las reflexiones



negativas producidas en los puntos en que están puestos a tierra los cables de guarda ver figuras (12) ni el efecto corona, factores que pueden disminuir ostensiblemente la tensión pico alcanzada en el cable de guarda y por ende la inducción. La influencia benéfica de las reflexiones negativas resalta la importancia de poner a tierra los cables de guarda en el mayor número de puntos posibles, siendo ideal hacerlo en cada poste o estructura. [7]

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 podemos estimarlo como 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.

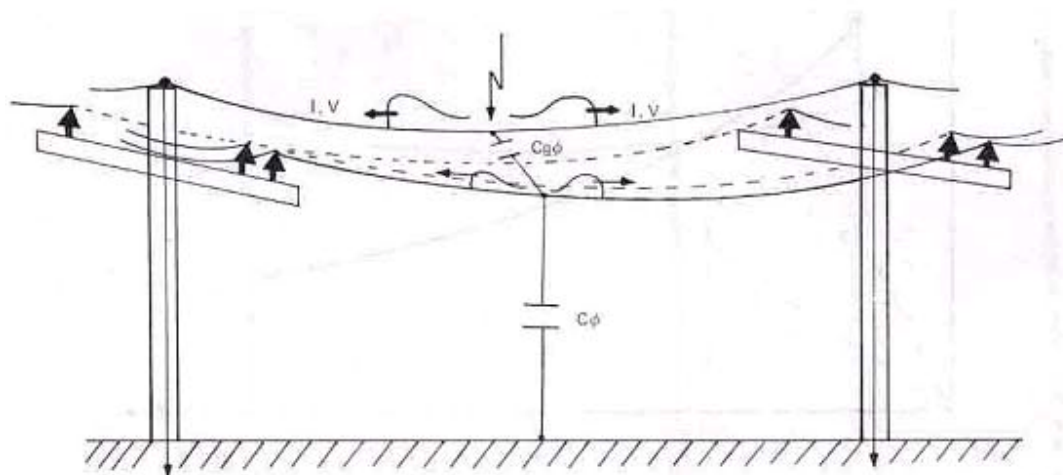


Figura (11) Acoplamiento de las sobretensiones desde el Hilo de Guarda.

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

La descarga impacta en el vano del cable de guarda o en la torre, repartiéndose entre los cables de guarda y la puesta a tierra del poste. Dado que usualmente la puesta a tierra en líneas de distribución es muy pobre (reduciéndose a enterrar una varilla copperweld), la



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

resistencia de puesta a tierra del poste es usualmente alta (mayor de $20\ \Omega$), con lo cual una corriente de rayo relativamente baja producirá un apreciable incremento de tensión entre el conductor de puesta a tierra (cable de guarda) y los conductores de fase, facilitando la aparición de un flameo inverso. La figura (12) ilustra este concepto.

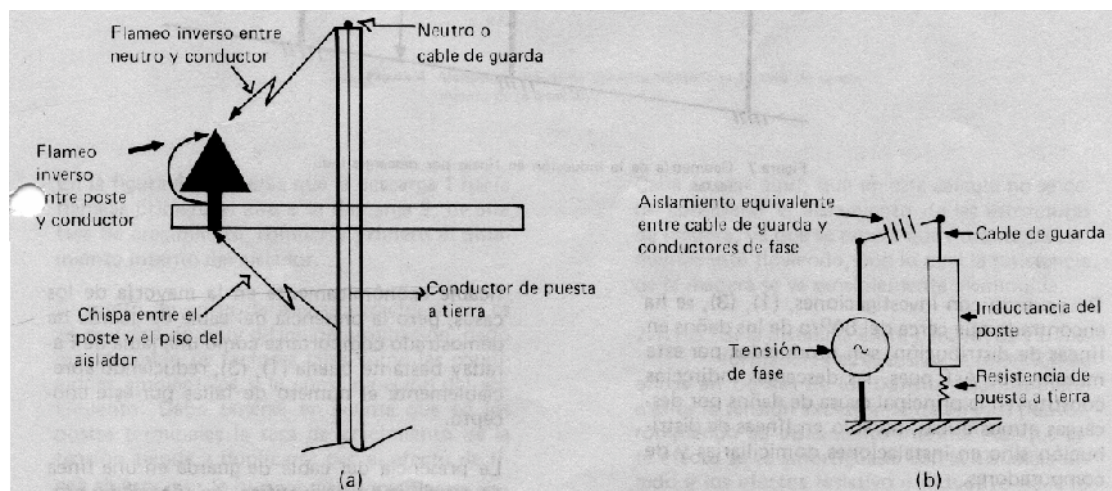


Figura (12) Fenómeno de flameo inverso en líneas de distribución (a. Rutas posibles, b. Circuito de flameo)

Para que ocurra flameo inverso en una línea de distribución, se requiere que la tensión producida por la corriente a tierra sea mayor que la tensión crítica de flameo inverso, más tres desviaciones estándar del aislamiento de la línea. Esta tensión, en líneas de distribución, no supera los 300 KV, con lo cual la corriente necesaria para producir flameo es aproximadamente: 15 KA ($I = 300\text{ KV}/20\ \Omega$). Para producir esta corriente se requiere alrededor de 30 KA de corriente de retorno con lo cual se espera que cerca del 50% de las descargas en la línea de distribución produzcan flameo inverso. Así pues, si la resistencia de puesta a tierra es alta, se producirá flameo directo por inducción o inverso por sobretensión en el cable de guarda, por lo que debe procurarse que este valor sea tan bajo como sea posible.

1.10.4 Sistema de Arreglo de Disipación (DAS).

El Sistema de Arreglo de Disipación (DAS) ^[1] ha sido diseñado para prevenir el rayo, para proteger al área considerada y al propio sistema. Los componentes del Sistema de Arreglo de Disipación son: el DAS Ionizador, los Spline Ball Sistema Desviador, y el CHEM-ROD o Electrodo de Tierra.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Algunos o todos estos componentes, pueden ser usados en el diseño de cualquier sistema de protección en forma específica.

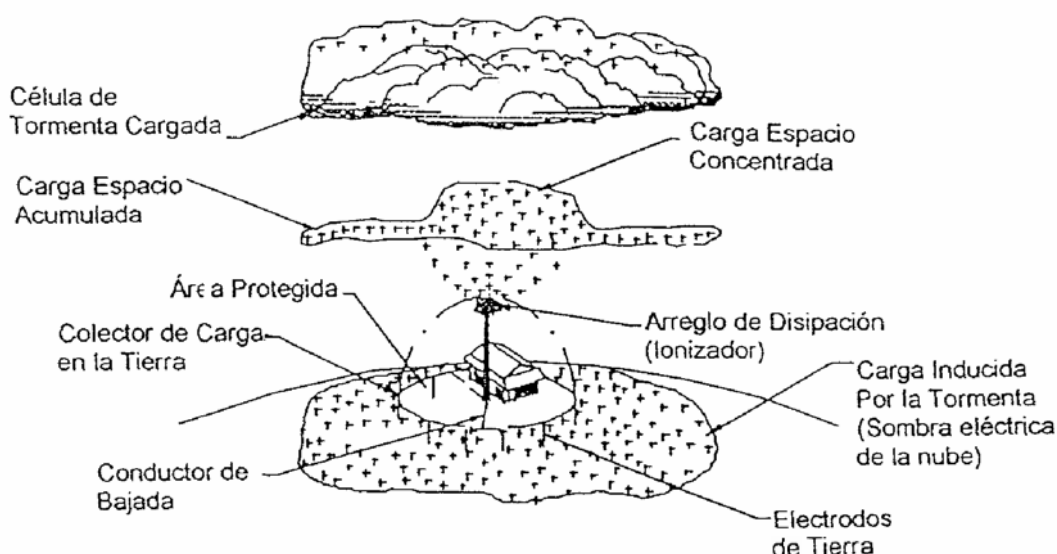


Figura (13) Sistema de Arreglo de Disipación (DAS).

Para prevenir una descarga eléctrica atmosférica en un área determinada, un sistema deberá ser capaz de reducir el potencial entre el área protegida y la célula de tormenta (nube), de tal manera que el potencial no sea suficiente para provocar el rayo dentro del área. Esto es, que el Sistema de Protección deberá liberar o disipar la carga electrostática inducida por la célula de tormenta en el área protegida ver fig (13), a un nivel de potencial en el que no se puede generar un rayo, ya que el potencial existente es incapaz de romper el dieléctrico del aire.

Los científicos que estudian los fenómenos atmosféricos, han encontrado que mucha de la energía de una tormenta, es disipada a través de lo que han llamado disipación natural, la cual es producida por la ionización de los árboles, del pasto, cercas y otros objetos terminados en punta, ya sean naturales o creados por el hombre, que están sobre la tierra e inmersos en el campo electrostático creado por la nube de tormenta. Por ejemplo, una célula de tormenta sobre el océano, producirá más descargas eléctricas atmosféricas, que la misma célula de tormenta sobre la superficie de la tierra, debido a la disipación natural sobre la tierra, la que reducirá la energía de la tormenta.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Consecuentemente, un ionizador multipuntas, es simplemente un dispositivo disipador más efectivo, multiplicando la disipación de la naturaleza, haciéndolo más eficientemente. El fenómeno de la punta de descarga, fue descubierto hace más de cien años. Se descubrió que cualquier objeto en forma de punta inmerso en un campo electrostático en donde el potencial se elevaba a más de 10 kV, transfería una carga eléctrica por ionización, a las moléculas de aire adyacentes a esa punta.

El Sistema de Arreglo de Disipación, se basa en el fenómeno de punta de descarga, 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 (14).

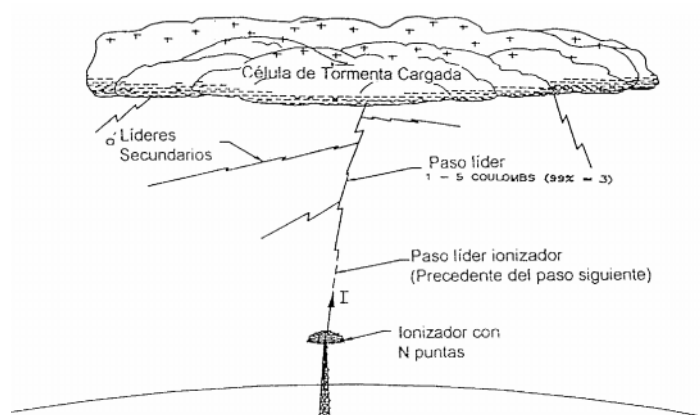


Figura (14) La Punta de Descarga como un Mecanismo de Transferencia.

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 (15)).



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

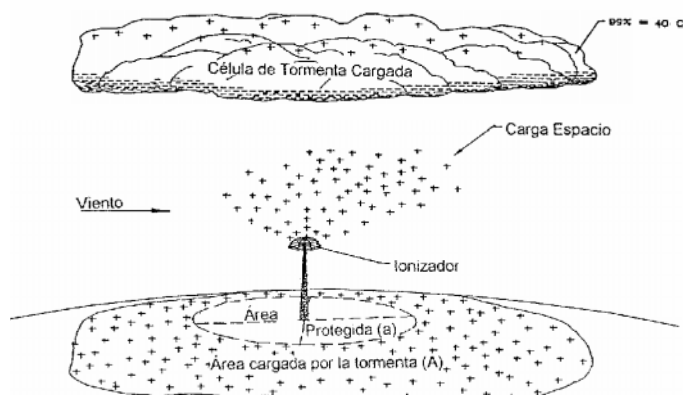


Figura (15) La Punta de Descarga como un Mecanismo de Transferencia.

Ionizador DAS.

El Ionizador DAS, es un dispositivo multipuntas para producir iones a través de miles de puntas simultánea y eficientemente. Como el campo electrostático se está incrementando, una sola punta creará flámulas (streamers) 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 exponencialmente. Como estos iones son dispersados en una gran área, no se generarán flámulas (streamers). En situaciones extremas, se produce una nube luminosa de iones, produciendo un halo luminoso momentáneo, alrededor del arreglo de disipación, y repentinamente, desencadenando un flujo de corriente.

El ensamble del ionizador, es muy sensible a un número de parámetros de diseño, algunos de los cuales pueden reducirse por fórmula y otros no. Estos factores incluyen capacidad o tamaño, forma, elevación, forma de la punta, altura de la punta sobre la superficie del arreglo, espaciamiento de las puntas, rango y velocidad del viento, más las características del lugar y sus alrededores.

El Sistema Spline Ball Diverter (SBDS)

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



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

El Módulo Spline Ball Ionizer (SBI, Ionizador de Esfera Erizada)

El Módulo Spline Ball Terminal (SBT, Terminal de Esfera Erizada)

Estas dos unidades, están certificadas como “Terminales aéreas” y ambas calificaron como módulos ionizadores. Las puntas múltiples hacen de ellos un ionizador. El espaciado adecuado entre puntas, asegura una corriente de ionización óptima, antes de que actúen como “colectores”. También están calificados como “Terminales aéreas”, y por lo tanto, 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 360° en azimuth y aproximadamente a 200° 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 ^{[1] [3]}. 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, convierten a un Sistema Colector Convencional, en un sistema preventor.

Spline Ball Terminal (SBT)

El Spline Ball Terminal es un sustituto directo de la varilla pararrayos convencional, el SBT puede instalarse en las bases de los pararrayos convencionales existentes. Usando SBT's se reducirá el riesgo de impactos directos de rayo arriba de un 85% los restantes serán capturados debido a la forma del despliegue de las puntas en 360°. Las varillas pararrayos son completamente inoperantes para capturar más del 20% de los impactos directos de rayo, los SBT's siempre los colectan cuando es necesario. Los SBT's están hechos en su totalidad con acero inoxidable.

Spline Ball Ionizer (SBI).

El Spline Ball Ionizer es el primo mayor del SBT pero con mayor capacidad para transferir la carga eléctrica. Los SBI's tienen aplicaciones en la Industria y en las Telecomunicaciones, en la protección contra impactos directos de rayo de las Torres y de estructuras diversas. Cuando se usan como complemento del Sistema DAS pueden



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

conectarse para formar un solo paquete para cada sitio. Usando SBI's puede reducirse el riesgo de impactos directos de un 85% a un 90% dependiendo de su aplicación. Los materiales usados en su construcción son totalmente de acero inoxidable.

Cuando es aceptable el riesgo de un pequeño número de salidas de operación de una línea, el SBDS, ofrece una alternativa muy efectiva a menor costo, cuando se compara con otras opciones. Su costo puede ser menos de la mitad, que el de un sistema de hilo de guarda convencional y resulta mucho más efectivo. Satisface con mucho, la alternativa de solución a la protección contra descargas eléctricas atmosféricas directas, sobre líneas de transmisión o distribución. Esto es, previene los rayos tanto en los conductores de fase, como en los hilos de guarda, colectando los rayos en las estructuras de soporte, que de otra manera, ocasionarían la salida de operación. El Spline Ball Ionizer, es un dispositivo patentado que ha probado ser un muy eficiente colector de rayos. El SBI, tiene más de 100 puntas, orientadas en todas direcciones.

Los requisitos de esta configuración y su eficiencia para coleccionar los rayos, hacen evidente la información siguiente.

Un efectivo y más competitivo colector de impactos directos de rayo para líneas de transmisión y distribución, debe satisfacer dos criterios:

- Localizarse en el lugar correcto, para interceptar cualquier descarga eléctrica atmosférica que pueda causar salidas de operación.
- Descargas eléctricas de baja energía, pueden ser ignoradas como no importantes. Poder crear un generador de flámula en el área indicada, nos brindara un colector más competitivo.

El lugar correcto, está dentro de un volumen de forma hemisférica conocido como "La Zona del Rayo" (Figura (16)). Uman establece que la "distancia de interceptación del rayo" del líder de la descarga eléctrica atmosférica, está limitada entre 10 y 200 metros, y es directamente proporcional a la corriente que circula en el canal de descarga del rayo o a la carga eléctrica dentro de la célula de tormenta. Por lo tanto, esta distancia define el radio de la zona potencial del rayo, la cual es igual a la "distancia de interceptación del rayo". Los datos de Uman, muestran que la "flámula" (streamer) más competitiva dentro de la



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

distancia de interceptación del rayo o zona de impacto, colectará al canal de descarga del rayo^[17].

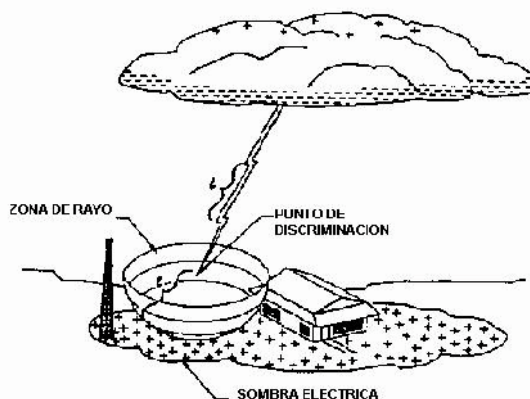
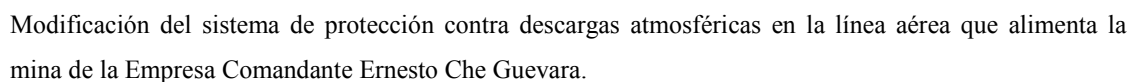


Figura (16) Configuración de la zona del Rayo.

El colector más competitivo, es una flámula generada por algún dispositivo de carga estática de la tierra, que alcanza el primer canal de descarga que baja de la célula de tormenta. Para “ganar” la competencia el generador de flámula, deberá ser el más eficiente que fuentes de potenciales de flámulas dentro de la zona del rayo^[17].

Investigaciones de la electrostática de la atmósfera, han demostrado que objetos terminados en punta inmersos en un campo electrostático de suficiente magnitud, generarán flámulas. Mientras más puntiagudo sea el objeto, más rápidamente se creará la flámula. El generador de flámulas más competitivo, deberá también estar orientado hacia el canal de descarga descendente, o al mismo eje. Sin embargo, el paso líder de la descarga, puede orientarse a cualquier dirección, el colector más eficiente, deberá tener puntas hacia adelante en todas direcciones, a las que el paso líder podrá alcanzar.

La habilidad del colector/generador de flámulas del SBI, supera la de otros componentes que hacen que la protección a las líneas de transmisión y distribución, sea mayor por un importante margen, lo que ha sido demostrado por diferentes pruebas. Excepto por la estructura de soporte en sí, solamente la flámula competitiva que podría adelantar un eventual flameo, vendría de los conductores de fase o de los hilos de guarda. Sin embargo, esos hilos tienen una superficie redonda y lisa, lo que limita o suprime la flámula, y no tiene una importancia contra una fuente de generación de flámulas de puntas.



Las pruebas dicen, que los diámetros de los cables usados en líneas de transmisión y distribución, requieren de voltajes elevados para hacer que los cables produzcan una flámula capaz de coleccionar una descarga, en comparación con una fuente de puntas adecuada para este fin.

Por lo tanto, los conductores de fase e hilos de guarda, no representan ninguna competencia y quedarían en gran desventaja comparan con el SBI, cuando los rayos potenciales estén dentro, o muy cerca, de su La Esfera de Influencia.

La única localización práctica para el colector SBI, es en el tope de cada estructura de soporte. La Figura (17) ilustra una de esas instalaciones, así también, como se instalaría en un poste de una línea de distribución. La Figura (18), muestra la instalación del SBI, en una línea de transmisión de 115 KV.

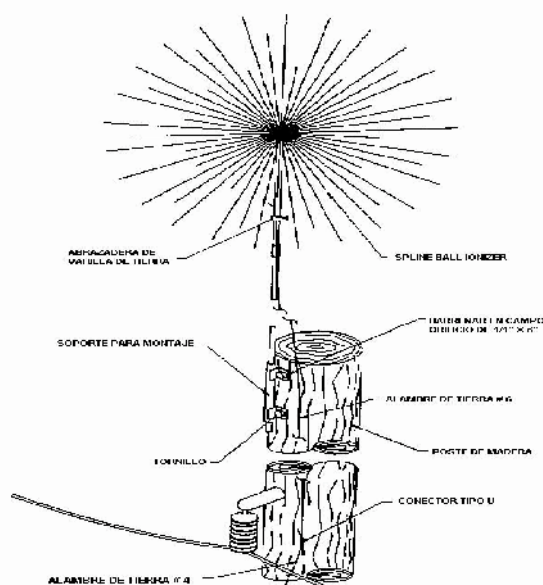


Figura (17) Instalación de un SBI en un poste de una línea de distribución.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

El tamaño y forma de la “Zona de Colección” [2] del SBI, es mayor al tamaño y forma de una zona de descarga de rayo dada, pero rotada 180° como se ilustra en la Figura(19). Con el Sistema Spline Ball Diverter (SBDS), una “zona de colección de rayo”, se forma alrededor de cada estructura de soporte. El radio (d_s), es al menos igual a la zona del rayo o a la distancia de interceptación de una descarga eléctrica para ser colectada, y se espera de un diámetro mucho mayor.

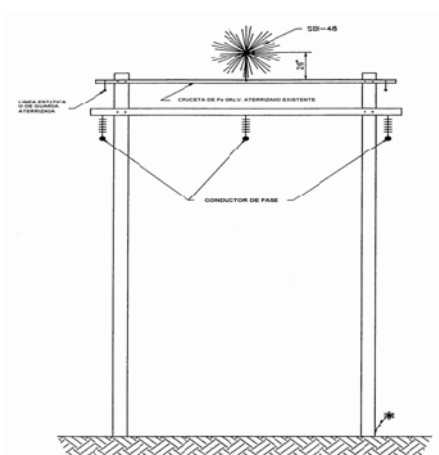


Figura (18) El SBI en una línea de transmisión de 115kV.

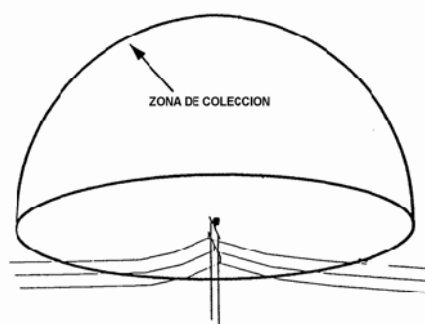


Figura (19) Zona de colección de un SBI.

Factor de las longitudes de espacio intercostal.

Un colector ideal de rayos, tiene algunas limitaciones en relación al rango de colección. Ese rango de terminación o interceptación de rayos, está relacionado con la longitud del espaciamiento interpostal o espacio entre estructuras de soporte, donde están instalados los SBI. [19].



Cuando se usan SBIs como colectores y se montan en las estructuras de soporte de línea, la influencia de la distancia entre esos soportes o longitud de espaciamiento, deberá relacionarse con la Zona de Rayo para esa línea. La figura (20), muestra el tamaño de la zona del rayo, en función de la corriente pico del rayo y el riesgo que representa ese rayo. El radio de la zona del rayo, es conocido por ser proporcional a la corriente pico en el canal de descarga del rayo. Puede variar de 15 a 160 metros para rayos de polaridad negativa. Los rayos de polaridad positiva, siempre producen grandes zonas de rayos, extendiéndose a más de 260 metros. Por lo tanto, usando el radio de la zona de rayo de los rayos de carga de polaridad negativa, para definir la zona de colección requerida para una línea dada, el Nivel Básico de Aislamiento (BIL) provee un diseño objetivo conservador ^[19]. Cualquier zona de colección y relacionada con longitudes de espaciamiento interpostal, debe ser relacionada a la mínima corriente pico que iniciaría la salida de operación, la cual está en función del BIL de la línea y las características del sistema de aterrizaje. Sin embargo, deberá darse por entendido de que espacios interpostales moderadamente grandes, representan menor riesgo, el cual puede estimarse en la Figura (20).

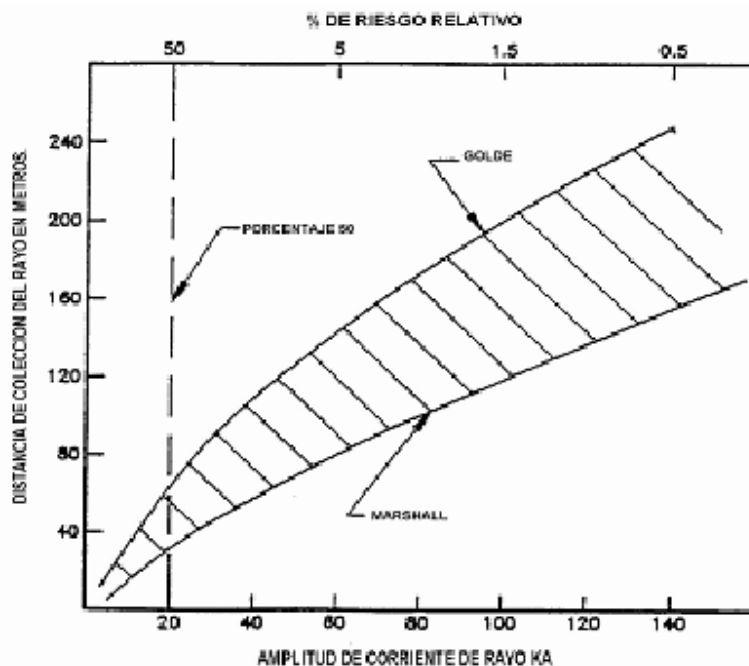


Figura (20) Grafica para estimar la distancia de colección del Rayo según sus KA.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

La Figura (21), muestra las Zonas de Colección del SBI en el centro y circundando las estructuras de soporte de la línea ^[19]. Cuando los claros interpostales son mayores a los que se consideran deseables, es necesario tomar en cuenta dos factores:

- Todos los rayos de mayor potencia serán colectados, ya que tienen mayor zona de colección que la marginal y menor energía de impacto. Los rayos con corrientes pico bajas, no causarán salidas de operación. En el peor de los casos, solamente un pequeño porcentaje puede causar la salida de operación de la línea.
- Ya que los únicos que pueden coleccionar los rayos, son los cables lisos y redondos de las líneas con claros de longitudes máximas, el riesgo de penetración por “rayos marginales” es muy bajo o nulo.

La competencia entre el SBI, el colector óptimo y los cables de superficie lisa que no presentan competencia. El SBI lanzará siempre una grande y más competitiva flámula.

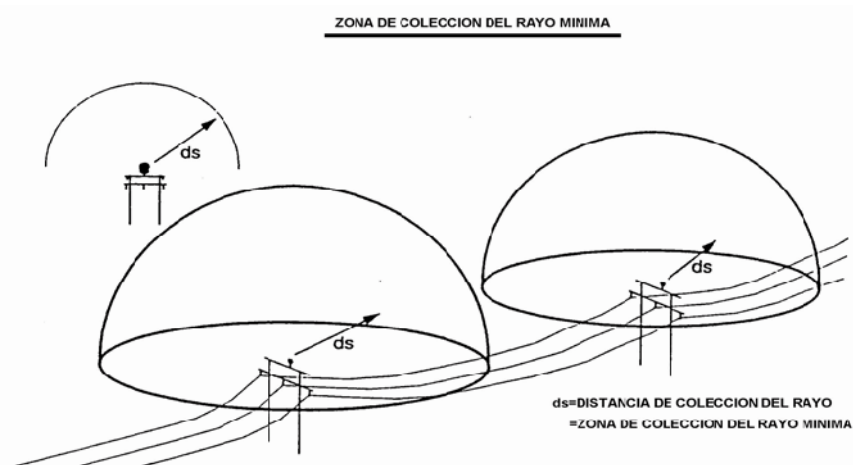


Figura (21) Instalación de SBIs en líneas de distribución.

El SBI, no tiene que estar dentro de la zona del rayo, si envía una flámula colectora, dentro de esa zona como se ilustra en la figura (22). Aún entonces, ganará la competencia, siempre y cuando no existan filamentos rotos en los cables de los conductores de fase, o alambres de tierra dentro de esa área.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

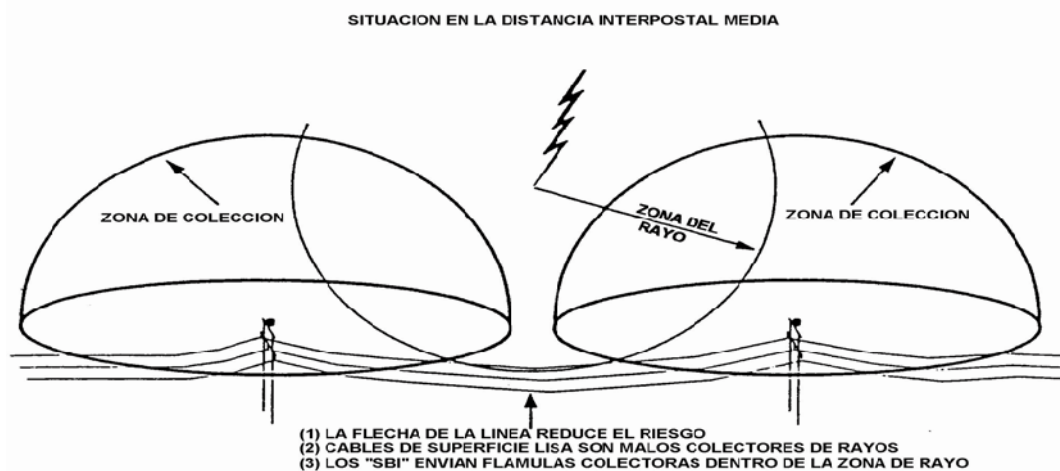


Figura (22) Colección fuera de la zona del Rayo.

Aumento de la longitud intercostal "segura".

La máxima corriente de pico de una descarga eléctrica atmosférica, terminando en cualquier línea dada que causará un flameo, está en función del Nivel Básico de Aislamiento (BIL) de la línea y la impedancia de surge del camino o medio de aterrizaje. Como se ilustró previamente, cuando el rayo termina en un SBI montado en un poste, ese camino está formado por un conductor de bajada y un electrodo de tierra.

Otros medios paralelos son de menor importancia. Cuando se usan torres o postes metálicos como conductores de bajada, la impedancia no se considera. Solamente los electrodos de tierra, adquieren una gran importancia como elementos del sistema de aterrizaje en su impedancia a tierra.

De estos datos, es evidente que la reducción de la Impedancia de Surge de la conexión a tierra, es de lo más importante para aumentar la seguridad de una posible "corriente de flameo", y por lo tanto, permitir un incremento en una longitud del claro interpostal "seguro". Para reducir la impedancia de interfase de aterrizaje, es necesario reducir tanto la inductancia del electrodo, como su resistencia del conductor de bajada (DC) a tierra, donde la impedancia es el producto de ambas.

Como podemos recordar el electrodo desarrollado por Lightning Eliminators & Consultants (LEC) esta diseñado para alcanzar esos objetivos simultáneamente en el mismo dispositivo.



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”. El cual es un método de descarga de la carga inducida, 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 del voltaje inducido en ese sistema, y en el campo electrostático que está presente entre el Sistema y la Célula de Tormenta (Nube de Tormenta).^{[2],[19]}.

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.

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

El voltaje 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 (ver figura(23)), no sufrirán afectaciones si no están fuera del área de la esfera de influencia del DDS.

Los voltajes transitorios en los conductores de fase que son inducidos normalmente por las elevaciones y caídas del campo eléctrico circundante, han probado ser también la causa del flameo (flashover), aún en las líneas de distribución de bajo voltaje^{[1],[19]}.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

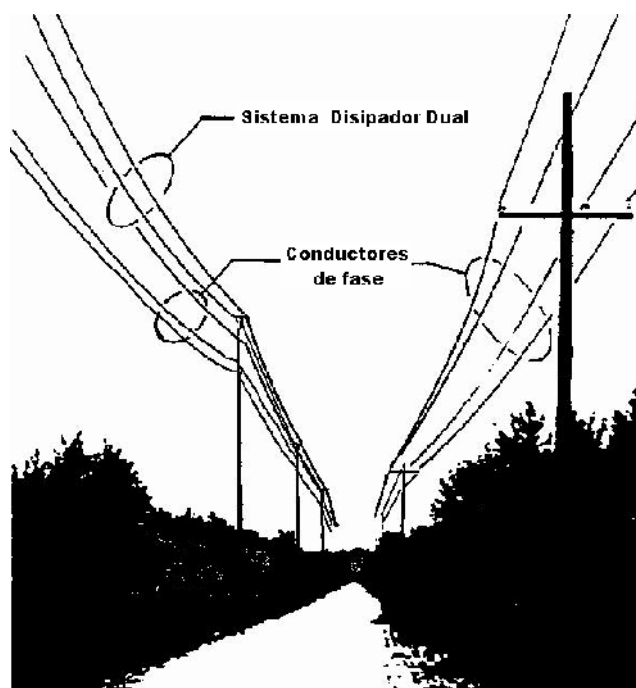


Figura (23) Sistema Disipador Dual.

El DDS, se ha usado por más de 20 años, previniendo rayos en los sistemas protegidos. Es un sistema de prevención contra rayos muy efectivo, pero su costo puede ser casi el doble de lo que cuesta un Sistema de Hilo de Guarda. Sin embargo, este es el único sistema para prevenir los rayos en un 100%.

Sistema de Aterrizaje.

Circuito colector de corriente de tierra (CCCT).

Un ionizador solamente, no es suficiente para la protección contra rayos. El sistema debe estar aterrizado. El Circuito Colector de Corrientes de Tierra provee la fuente de carga para mantener el flujo de corriente de iones a través del ionizador y la descarga eléctrica del área protegida. El Circuito Colector de Corriente de Tierra, está diseñado para proveer un aislamiento eléctrico o un subsistema de tierra flotante, para el área protegida con respecto a la tierra. Como la carga inducida creada por la tormenta está en la superficie de la tierra, la parte de la superficie de la tierra que contiene las instalaciones a protegerse, deberá estar rodeada por el Circuito Colector de Corrientes de Tierra. El CCCT, está compuesto por un circuito en la periferia del área protegida, de cable de cobre desnudo, semiduro, o tubing flexible de cobre de $\frac{1}{2}$ " de diámetro, enterrados a una profundidad de



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

25 cms, y electrodos para tierra de entre 4 y 6 pies de longitud (CR-4 y CR-6), dependiendo del área a proteger, a intervalos de aproximadamente 10 metros. El área cubierta por el CCCT, puede integrarse por una red o malla, a la cual también deben conectarse las estructuras y el Sistema de Tierras.

Al moverse la carga eléctrica dentro del área protegida, su primera interfase es con el CCCT, el cual provee un camino preferencial de este punto de interfase, al disipador o arreglo ionizador, por medio de los cables de servicio, de este modo, esencialmente forma un desvío del área protegida. De esa manera, se crea un flujo de corriente en la superficie de la tierra circundante, lo que causa una caída de voltaje por la resistencia del terreno. De modo que, eléctricamente integrada, se establece un área aislada por el CCCT, en la que el potencial se reduce a un valor mucho más bajo que el que está alrededor del área protegida. Los electrodos de tierra cortos, dan al área aislada un camino suficiente para asegurar la recolección de cualquier carga eléctrica, inducida por la célula de tormenta en el área protegida^{[1],[19]}.

La función del conductor de carga, provee en forma directa, un camino de baja impedancia del CCCT al ionizador. En contraste con un sistema de pararrayos, estos cables de tierra conducen niveles de corriente muy bajos, lo que representa seleccionar conductores de menor calibre, el cual se selecciona atendiendo más a su resistencia mecánica, que a la capacidad de corriente que van a conducir. La máxima corriente que conducen, está en el rango de los miliamperes. Las mediciones efectuadas, indican menos de 0.5 amperes en el momento de máximo flujo a través del CCCT (excepto en raras ocasiones).

Electrodo de Tierra CHEM-ROD.

El Electrodo de Tierra CHEM-ROD, de Lightning Eliminators & Consultants (LEC), tiene una bajísima impedancia de surge, lo cual da como resultado, una gran eficiencia en el Sistema de Tierras. Provee la perfecta baja resistencia de interfase 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



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

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.

El CHEMROD, favorece, la reducción de la resistencia del conductor de bajada (DC), en 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),^{[3],[19]} puede representar importante reducción en la resistencia y la impedancia de surge a tierra.

1.10.5 Pararrayos autovalvulares.

Se denominan, en general, pararrayos autovalvulares a los dispositivos destinados a descargar las sobretensiones producidas por descargas atmosféricas, por maniobras o por otras causas que, en otro caso, se descargarían sobre los aisladores o perforando el aislamiento, ocasionando interrupciones en el sistema eléctrico y, en muchos casos, desperfectos en los generadores, transformadores, etc...

Para que su funcionamiento sea eficaz, los descargadores han de estar permanentemente conectados a las líneas pero solamente han de entrar en funcionamiento cuando la tensión alcance un valor conveniente y superior, naturalmente, a la tensión de servicio. Es decir, el descargador actúa a la manera de una válvula de seguridad^{[11],[18]}.

Como en las primeras instalaciones en que se emplearon estos dispositivos, su misión fundamental era limitar las sobretensiones de origen atmosférico, recibieron el nombre de pararrayos. Posteriormente amplió su misión, utilizándose también para proteger las instalaciones contra las sobretensiones de origen interno. Por eso, parece mas adecuada la denominación de descargadores de sobretensión. En lo sucesivo, utilizaremos indistintamente ambas denominaciones y el lector debe saber que nos referimos al mismo dispositivo.

Los descargadores casi exclusivamente utilizados actualmente se denominan pararrayos autovalvulares o, también, descargadores autovalvulares y, mientras no digamos expresamente lo contrario, nos referiremos a este tipo de descargadores.

Un descargador autovalvular está constituido por un explosor o espinterómetro y una resistencia en serie. El explosor está ajustado para que salte la descarga entre sus



electrodos a cierta tensión denominada tensión de encebamiento del descargador, lo que establece la conexión con tierra a través de la resistencia. Después de la disminución del valor de la sobretensión, el explosor suprime, a su próximo paso por cero, la corriente de la red, que se restablece a la tensión de servicio pero cuya intensidad está limitada por la resistencia; por lo tanto, la línea queda nuevamente separada de tierra. La resistencia está constituida por un material aglomerado que tiene la propiedad de variar su resistencia con rapidez, disminuyendo cuanto mayor es la tensión aplicada y adquiriendo un valor elevado cuando esta tensión es reducida, o sea que tiene una característica de resistencia eléctrica muy adecuada para el funcionamiento del descargador, ya que a la tensión de servicio opone mucha resistencia al paso de la corriente mientras que, en caso de sobretensión, su resistencia eléctrica disminuye, permitiendo así la fácil descarga a tierra con la consiguiente eliminación de la sobretensión ^[18].

El explosor de un descargador tiene una doble misión: debe cebarse en caso de aparición de la sobretensión y, después, debe suprimir la corriente de fuga a su paso por cero, después del amortiguamiento de la onda de sobretensión. En los descargadores más modernos esta doble misión está encomendada a dos explosores conectados en serie y denominados, respectivamente, explosor de cebado y explosor de extinción. En los modelos más antiguos, el explosor de cebado estaba constituido por dos semiesferas, cuya distancia disruptiva era ajustable y dependía de la tensión de cebado; en estos modelos como elementos de extinción se utilizaban electrodos planos, con interposición de discos aislantes. El gran inconveniente de este sistema era el valor relativamente pequeño de la capacidad entre las dos semiesferas, con relación a la de los electrodos planos, de lo que resulta un defectuoso reparto de tensión, ya que el explosor de cebado recibía la mayor parte de la tensión. Por esta razón, esta disposición fue abandonada y sustituida por el sistema de electrodos planos apilados sin dispositivo de cebado separado. Casi todos los descargadores modernos adoptan esta disposición. Vamos de describir las partes más importantes que constituyen la mayoría de los descargadores, son las siguientes:

Explosor de cebado: Este explosor aísla de la línea los elementos del descargador para las tensiones normales de servicio, pero se ceba cuando aparece una sobretensión que sobrepasa cierto nivel; algunos fabricante lo denomina explosor de aislamiento. La



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

superficie de uno de los electrodos está provista de dientes de aristas vivas; estas aristas están en contacto con el anillo de cerámica que separa los electrodos; este dispositivo presioniza el explosor antes de que la tensión alcance el valor de cebado y asegura la constancia de la tensión de cebado.

Explosor de extinción: Una serie de explosores, cuya separación entre electrodos está mantenida por anillos aislantes, tiene como misión interrumpir la corriente de fuga a su primer paso por cero (esta corriente de fuga es la corriente a frecuencia industrial que tiende a mantenerse después del paso de la corriente de descarga), cerrando el camino conductor abierto por la corriente de descarga.

Bloque autovalvular: Este bloque tiene una característica tensión - corriente, no lineal y se comporta como una resistencia de pequeño valor cuando es recorrido por corrientes elevadas, limitando de esta forma la caída óhmica en los bornes del descargador valvular durante el curso de la descarga. Por el contrario, esta resistencia es más elevada para la corriente de fuga, que es mucho más pequeña, cuyo valor limita a un valor moderado, fácilmente cortado por el explosor de extinción.

Existen modelos de descargadores que poseen un dispositivo de eyección de la conexión de tierra. Cuando se avería el descargador a causa de una sobrecarga térmica (caso de funcionamiento sobre una red con tensión de línea demasiado elevada), funciona el dispositivo de eyección, desconectando el cable de conexión a tierra, y poniendo de esta forma el descargador fuera de servicio, lo que evita un defecto línea - tierra en la red. Este dispositivo suprime el peligro de explosión del descargador.

Un resumen más detallado de las características de funcionamiento de los descargadores valvulares se encuentra en el **Anexo 1**.

1.11 Sistemas de puesta a tierra (spat).

La protección eléctrica y electrónica tiene pues dos componentes fundamentales, que son indisolubles uno de otro: los equipos protectores (pararrayos, filtros, supresores, Vía de Chispas, etc.) y el sistema dispensor o Sistema de Puesta a Tierra (SPAT), entendiéndose este como el pozo infinito donde ingresan corrientes de falla o transitorios y no tienen retorno porque van a una masa neutra y son realmente dispersados ^{[11],[16]}.



La puesta a tierra se basa en la propiedad de que las cargas eléctricas (electrones) siempre intentarán alcanzar valores energéticos mínimos para estar en equilibrio. La tierra es el punto de potencial cero, masa o energía mínima que mejor se adapta a los requisitos de las instalaciones eléctricas, siendo utilizada como tensión de referencia o tensión neutra. No obstante, el valor de este potencial no es constante en todos los terrenos, viéndose influenciada por corrientes telúricas u otras anomalías del substrato. Tampoco la resistividad del terreno es igual y uniforme para los distintos terrenos, dependiendo de los materiales que lo forman. Ni tan siquiera para un mismo tipo de terreno, los valores de la resistividad se mantendrán constantes a lo largo del año, variando desde valores mínimos en épocas lluviosas y húmedas, a valores máximos durante los periodos secos.^[11]

1.11.1 Finalidad de las puestas a tierra

Los objetivos principales de las puestas a tierra son:

1. Obtener una resistencia eléctrica de bajo valor para derivar a tierra Fenómenos Eléctricos Transitorios, corrientes de falla estática y parásita; así como ruido eléctrico y de radio frecuencia.
2. Mantener los potenciales producidos por las corrientes de falla dentro de los límites de seguridad de modo que las tensiones de paso o de toque no sean peligrosas.
3. Hacer que el equipamiento de protección sea más sensible y permita una rápida derivación de las corrientes defectuosas a tierra.
4. Proporcionar un camino de derivación a tierra de descargas atmosféricas, transitorios y de sobretensiones internas del sistema.
5. Ofrecer en todo momento y por el tiempo de vida útil del sistema de puesta a tierra (± 20 años) baja resistencia eléctrica que permita el paso de las corrientes de falla.
6. Servir de continuidad de pantalla en los sistemas de distribución de líneas telefónicas, antenas y cables coaxiales.

1.11.2 Clasificación de las puestas a tierra.

Existen diferentes tipos de puesta a tierra, las cuales tienen diferentes funcionamiento. Las puestas a tierra pueden separarse en dos categorías:



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

- Puesta a tierra para protección, que incluye la puesta a tierra:
- Para sistemas de pararrayos.
- Protección contra contactos directos.
- Puesta a tierra de funcionamiento, la cual se puede realizar empleando los diferentes tipos de neutro.

1.11.3 Partes de que consta una puesta a tierra.

Estos elementos los podemos agrupar de la siguiente forma:

- Terreno o tierra. Encargado de disipar todas las energías que a él accedan.
- Toma de tierra. Parte enterrada en el terreno, formada por:
- Los electrodos.
- Línea de enlace con tierra.
- Punto de puesta a tierra.

Instalación de puesta a tierra. Parte exterior al terreno, formada por:

- Línea principal de tierra.
- Derivaciones de la línea principal de tierra.
- Conductores de protección.

Un resumen más detallado de las consideraciones para el diseño de una puesta a tierra se puede observar en el **Anexo 2**.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Conclusiones Parciales.

- Se realizó un análisis de las causas que originan las tormentas atmosféricas y sus diferentes variantes.
- Se especificaron las consecuencias que traen consigo las tormentas eléctricas en los sistemas eléctricos.
- Se especificaron los principales tipos de protecciones contradescargas atmosféricas, desde los más antiguos hasta los más actuales.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Capítulo II

Configuración del Sistema de Protección Contra Descargas Atmosféricas.



Capítulo II: Configuración del sistema de protección y selección del equipamiento necesario.

Introducción.

La implementación de una variante de protección contra descargas eléctricas en las líneas aéreas de la mina, es la necesidad real de esta empresa, por lo que en este capítulo se realizarán mediante una descripción del sistema actual que no ha podido alejar de las afectaciones a las referidas líneas. Además de la selección del sistema a proponer con los cambios que este exige en estas líneas y elementos interconectados a ellas. Incorporando el método de medición de resistividad y cálculo de mallas a tierra tan importante para un sistema de protección de este género.

2.1 La línea aérea de la mina.

La línea aérea actual está compuesta por tres conductores de línea de AL-70mm que cubren una distancia aproximada de 19km. Sustentados en aisladores de tipo pedestal de porcelana y aisladores suspensión de cristal que van ubicados en crucetas tipo galvanizadas de 100x2400mm (ancho x largo). Por encima de las crucetas y atornilladas al extremo superior de cada poste son fijadas las vigas soportes del cable de guarda. Este último es de AL-35mm y va adosado a la viga, además de ser aterrado en cada poste, mediante un electrodo o pica de tierra de Acero galvanizado de 1,5m de profundidad y 23mm de diámetro.

Para la protección contra sobretensión son conectados entre cada fase y tierra descargadores valvulares, colocados preferentemente al principio y final de la línea o de sus ramificaciones. También pueden encontrarse en el interior de las pizarras o en la parte exterior conectados a los aisladores pasamuros de estas.

Encontramos también drop-out (desconectivos) en la entrada de los transformadores que van conectados a la línea aérea con el objetivo de facilitar su mantenimiento o revisión en caso de falla.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

2.2 Descripción del sistema actual.

El sistema de protección contra descargas atmosféricas y sobretensiones diseñado para la fábrica esta basado en el sistema convencional de punta de Franklin, bajante de tierra y electrodo de puesta a tierra aprovechando las chimeneas, torres de alumbrado y algunas torres levantadas con este propósito. No existía hasta alrededor de 1.5 años ningún otro elemento de protección, cuando fueron montados 8 descargadores valvulares (tipo-CS19A0690) en 6 exhausters de secaderos y 2 exhausters de los silos de Hornos, de estos últimos uno aún sin conectar. Estos equipos son alimentados con 6kV desde la subestación 3SD y 2SD, los descargadores que los protegen han sido seleccionados, con un voltaje nominal de 9kV.

Cabe destacar que los exhausters son motores de 6kV, 630kW y figuran dentro de los equipos que más se averían por descargas atmosféricas junto a los motores sincrónicos de las excavadoras (ver figura (25)) de la mina (6kV, 500kW) y los transportadores TR-2, TR-4A y TR-4B. Estos equipos son alimentados de la misma subestación eléctrica o guardan relación eléctrica y esquemática a pesar de estar físicamente separados (ver fig. 25).

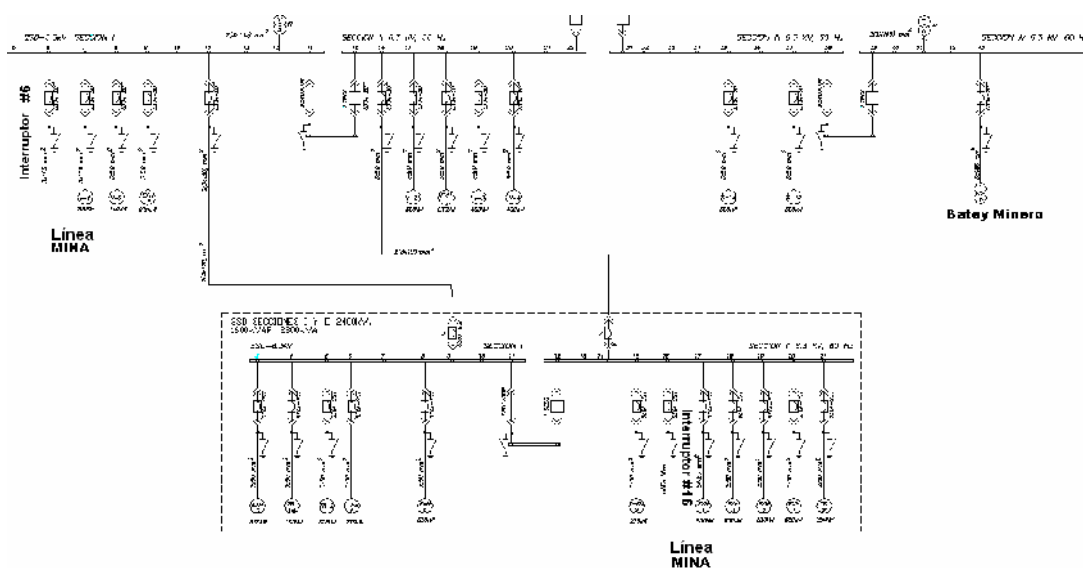


Figura (24). Esquema monolineal actual de las subestaciones 2SD y 3SD.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

En este esquema (figura (24)) se muestran las secciones de barra de las subestaciones 2SD y 3SD donde se encuentran conectados los exhausters, las líneas aéreas de la mina y los transportadores.

El caso de los motores sincrónicos de las excavadoras es el que acumula mayor cantidad de afectaciones por las incidencias directas o indirectas de descargas eléctricas, lo que se explica, por el hecho de que estos son alimentados por medio de líneas aéreas que no cumplen en su totalidad con los requisitos para protegerlos eficazmente.

La protección para las líneas aéreas según diseño del proyecto de la fábrica es el sistema convencional de hilo de guarda, bajantes de tierra y picas de tierra en forma de malla.

Al principio de su puesta en explotación, en el año 1986 las líneas 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 varias ramificaciones con distancias entre 1-3 Km llegando a alcanzar 13 Km su tramo mas largo con una altitud entre 68-185m.

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 también conectadas las líneas aéreas de la mina, han sufrido envejecimiento prematuro o perforaciones de su aislamiento y por ende han ocasionado serias afectaciones a la producción, como consecuencia de la ausencia de un sistema de protección eficiente.

La protección por hilo de guarda se ha complementado parcialmente con descargadores valvulares ubicados en las pizarras de distribución que alimentan cada una de las excavadoras pero aun existen deficiencias como:

1. Ausencia del hilo de guarda en algunos tramos de línea aérea.
2. Ausencia de descargadores en algunos ramales de la línea principal y los ramales.
3. Cercanía de uno de los ramales con la línea de 110kV que alimenta la fábrica (menos de 7m).
4. Conexión no equipotencial del sistema de puesta a tierra (SPT) de la mina con el SPT de la fábrica.
5. Ausencia de mallas a tierra en algunas instalaciones, tanto tecnológica como de servicio.
6. Ausencia de pica de tierra en gran parte de los postes de la línea aérea.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

7. Ausencia de dispositivos de protección en los cuadros de mando de los motores sincrónicos de las excavadoras.
8. Ausencia de dispositivos de captación y de aterramiento en el boom de las excavadoras.
9. Ausencia de seccionalizadores en los ramales de la línea aérea.
10. Inexistencia de una correcta coordinación entre los descargadores ubicados en las líneas aéreas de la mina y los montados en otros equipos.
11. Ausencia de supresores en los circuitos secundarios de las excavadoras.

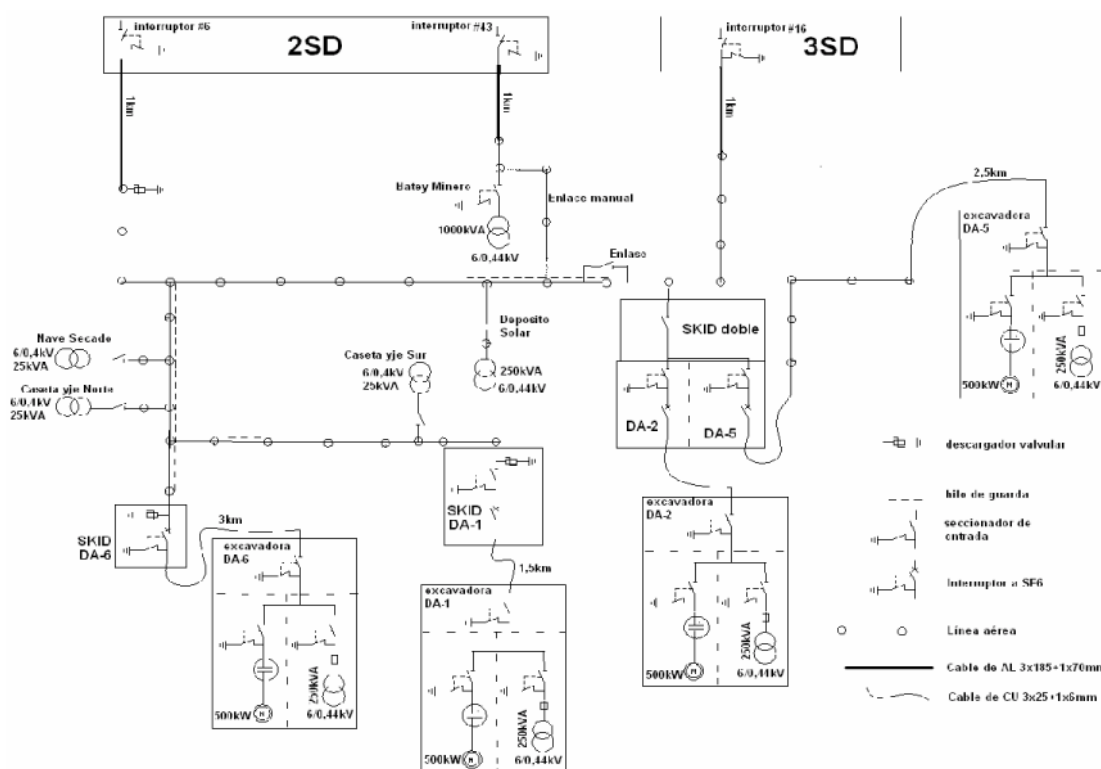


Figura (25). Esquema monolineal actual, de las líneas aéreas de la mina con las excavadoras conectadas.

2.3 Selección de la nueva variante de protección contra descargas atmosféricas.

Las sobretensiones que ingresan al circuito de media tensión en la empresa comandante Ernesto Che Guevara, provienen fundamentalmente desde las líneas aéreas de la mina, producto de descargas atmosféricas que inciden de forma directa o indirecta en las mismas, de manera que el estudio realizado en el capítulo anterior, nos ofrece las



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

variantes de protección de mayor confiabilidad para estos casos. Por la importancia de los equipos a proteger dentro del proceso productivo y las posibles afectaciones económicas hemos seleccionado El Sistema Spline Ball Diverter (SBDS), el cual tiene entre otras las siguientes ventajas:

1. Posee una óptima disipación de cargas para un ionizador pequeño de bajo costo.
2. Previene la mayoría de las descargas y atrae todas las otras.
3. Minimiza el potencial de daño.
4. Posee un año de garantía y la devolución del monto inicial de la inversión o el descuento de este, en caso de una nueva inversión que garantice una total protección.

Aun cuando el sistema propuesto posee una efectividad muy elevada, no se debe dejar de dotar nuestro circuito de una protección secundaria, brindada por los descargadores valvulares que correctamente seleccionados darán una mayor confiabilidad al sistema y mayor seguridad a los equipos que se relacionan eléctricamente con las líneas aéreas de la mina

2.4 Implementación de la variante de protección seleccionada.

Debido a la implementación de la nueva variante de protección contra descargas eléctricas, se deben acometer diferentes cambios en las líneas aéreas de la mina (ver figura (26)). Entre los cambios que se efectuarán se encuentran los relacionados a continuación:

- Se colocarán en la parte superior del soporte del cable de guarda en cada uno de los postes un Terminal de esfera erizada (SBI).
- Mantener el hilo de guarda, e instalarlo en todos los tramos que no lo poseen, aterrándolo en todos los postes.
- El aterramiento se llevará a cabo en cada uno de los postes con electrodos químicos CHEM.ROD, que por su alta conductividad utilizaremos para lograr una puesta conjunta de aproximadamente 1Ω .
- Llevar a cabo las conexiones necesarias para lograr la equipotencialidad del sistema en general de la fábrica (Mina-Fábrica).
- Lograr el montaje y conexión de descargadores valvulares en las SKID de cada excavadora.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

- Colocar descargadores en las pizarras de alimentación de los motores sincrónicos de las excavadoras.
- Dotar las líneas con descargadores valvulares al principio y final de la misma.
- Dotar las líneas con seccionadores en los ramales, para aislar la parte afectada o en mantenimiento.
- Construir una malla a tierra en cada una de las pizarras de distribución portátil de las excavadoras (SKID), basando su fabricación en cálculos en los que se considere la resistividad más específica, justamente en cada lugar donde serán enclavadas, para lograr una puesta a tierra no mayor de 4Ω .
- Utilizar electrodos químicamente tratados (CHEM.ROD) en la fabricación de las mallas de tierra.

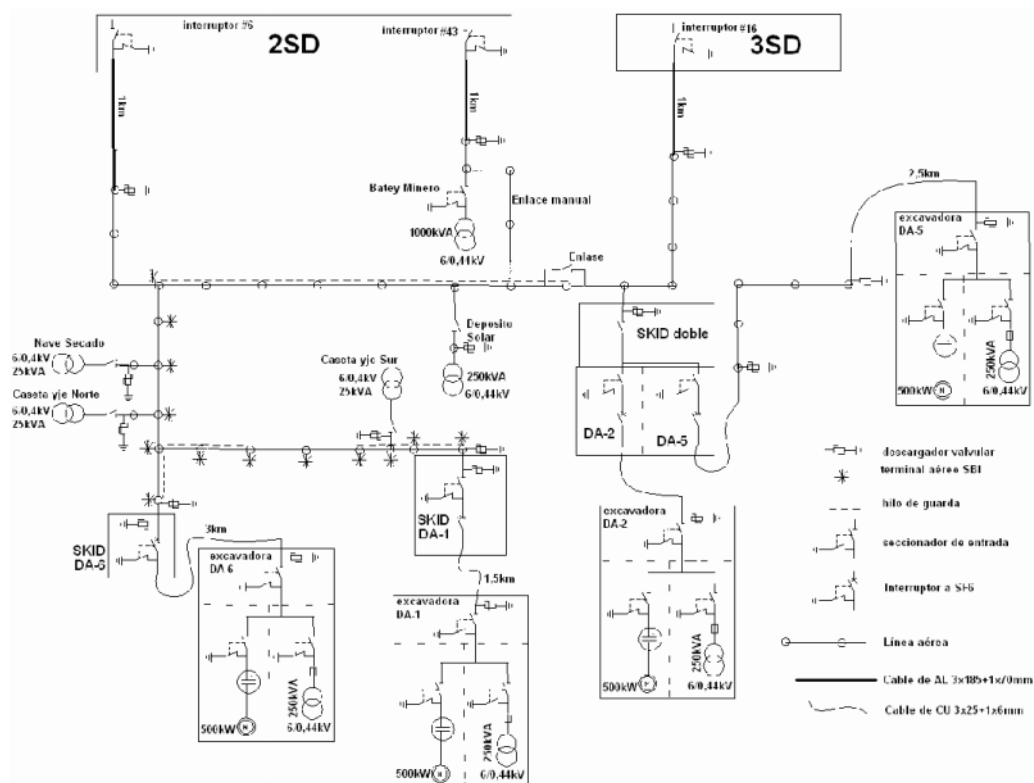


Figura (26). Propuesta de sistema de protecciones contra descargas atmosféricas.

Una descarga atmosférica en la línea aérea provocaría una sobretensión en ambas direcciones de las mismas, que de no contar con los descargadores valvulares llegarían a los equipos conectados a ella o se relacionarían eléctricamente. Por esta razón proponemos



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

la instalación de descargadores en diferentes lugares para esto nos basamos en la forma de protección escalonada o como también se conoce, aguas abajo ^[11]. De esta forma las sobretensiones que no sean eliminadas totalmente por el descargador que se encuentra en la línea, serán descargadas por los que se encuentran aguas abajo. En la figura (27) se muestra de manera simplificada como estarán distribuidos los descargadores para lograr una buena protección de los equipos tanto de la mina como de los secaderos. Estos serán ubicados en los terminales de las líneas aéreas, tendrán una corriente nominal de descarga de 10kA, con una tensión nominal de 9kV y tensión máxima de operación de 7.65kV. Los instalados en las pizarras de distribución portátil de las excavadoras (SKID), tendrán una corriente nominal de descarga de 10kA, con tensión nominal de 9kV, tensión máxima de operación 7.65kV. Las barras de las subestaciones y lo más cerca posible de los equipos a proteger con los mismos niveles de tensión y corriente anteriores.

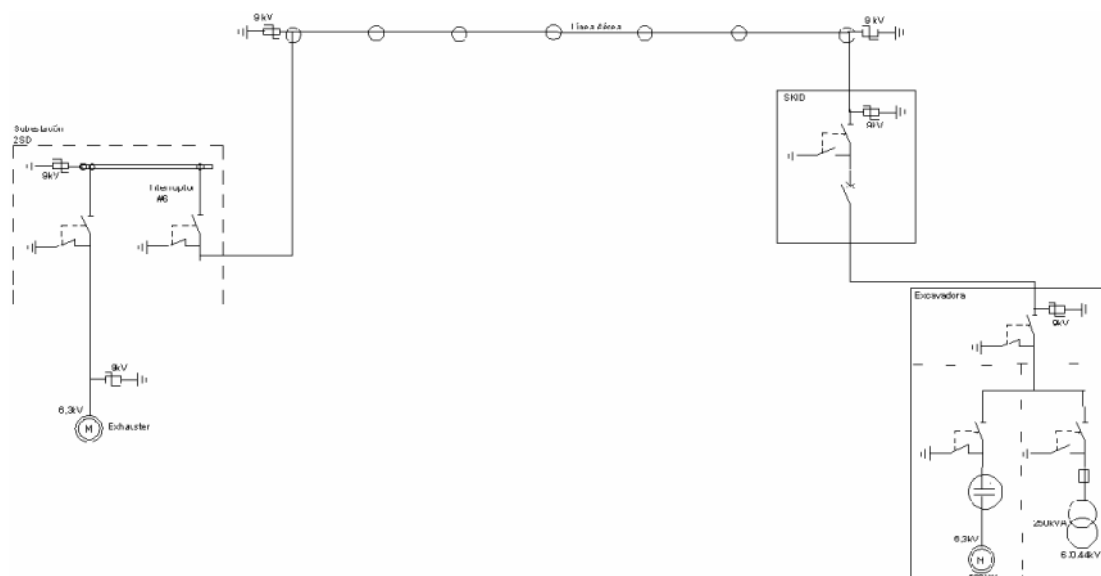


Figura (27). Esquema simplificado de la ubicación física de los descargadores.

El sistema propuesto exige valores de resistencia de tierra significativamente bajos, por lo que se demostrará a través de mediciones que la resistividad promedio del terreno minero donde se encuentran enclavadas las líneas y las pizarras de distribución es muy alta y requiere de un cálculo independiente para cada una de ellas en la que se obtendrá la cantidad, diámetro y profundidad de los electrodos, además del tipo a utilizar.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

La mediciones de resistividad para la elaboración de las mallas a tierra deben realizarse en el momento de llevar a la práctica la implementación de la variante de protección. Esto debe ser así debido a que este terreno tiene alta y variable resistividad, además que las instalaciones donde se deben llevar a cabo, cambian de lugar en relativamente cortos periodos de tiempo, por lo que pueden estar situadas en otro terreno en este momento. Sugerimos el método de Wenner de 4 polos.

2.4.1 El método de Wenner de 4 Polos.

Este método consiste en determinar la resistividad aparente del suelo colocando 4 picas pequeñas o electrodos de referencia separadas a igual distancia en el lugar donde se pretende conocer la resistividad. El espesor de la capa del terreno a la que se mide la resistividad es directamente proporcional a la separación entre las picas:

$$h = \frac{3}{4}a \quad (2.1)$$

Donde:

h: profundidad de medición.

a: Separación entre electrodos de medición.

Al introducir una corriente (I) en el terreno a través de las picas C1 y C2, el instrumento registra la diferencia de potencial (U) entre las picas P1 y P2. El cociente entre U e I es la lectura de resistividad (R_E) que ofrece el instrumento. Ver figura(28).



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

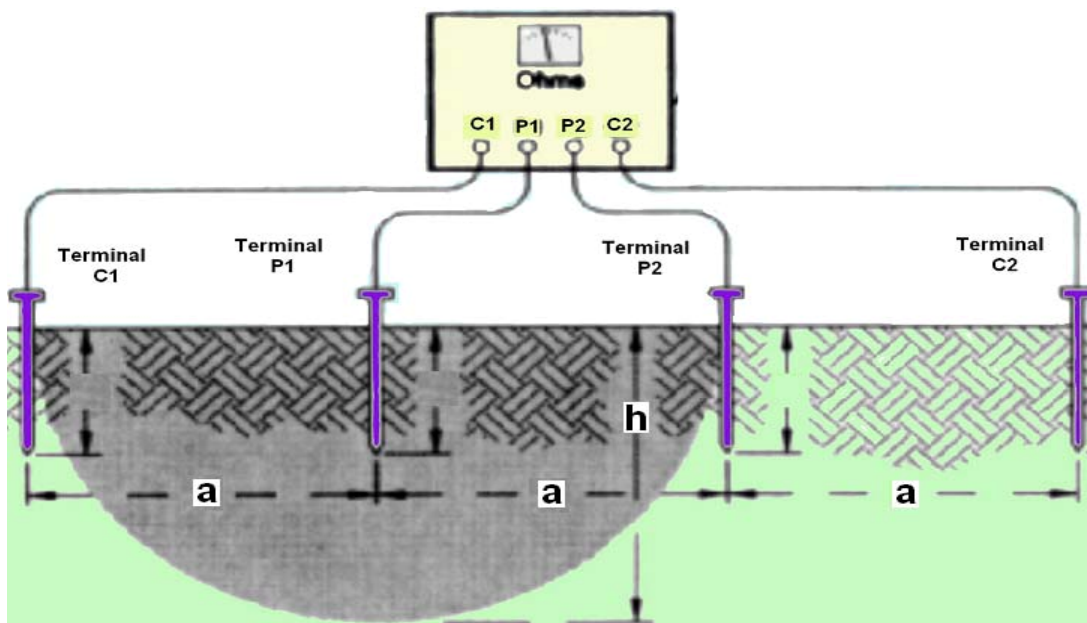


Figura (28). Esquema para la medición de la resistividad del terreno mediante el método Wenner de 4 polos.

El valor de la resistividad se calcula, para un espesor del terreno entre la superficie y una profundidad h , mediante la siguiente expresión:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R_E \quad (2.2)$$

Obteniéndose el valor medio de resistividad del terreno entre la superficie y una profundidad h . Éste depende de la composición y espesor de los diferentes estratos que lo conforman pero suficiente para nuestros cálculos.

Las picas deben estar alineadas y no tienen que ser muy largas pues no será necesario introducirlas en el terreno más de 30 cm.

Los cables de conexión tienen que ser forrados y preferiblemente de colores diferentes para facilitar su identificación. Una vez extendidos no deben cruzarse entre sí.

La siguiente tabla contiene las mediciones efectuadas en diferentes instalaciones de la mina empleando el método antes descrito.



Tabla 2.1 Resistividad del terreno

Mediciones de resistividad del terreno.		
Lugar	Primera Medición	Segunda Medición
SKID DA-1 Yagrumaje norte	3019,2	3014,4
SKID DA-2 Punta Gorda	278,2	198,4
SKID DA-5 Punta Gorda	114,6	110,3
SKID DA-6 Yagrumaje norte	403,9	401,92
Caseta Yagrumaje norte	859,2	791
Edificio UB Minera	71	72,22

2.4.2 Calculo de la malla a tierra.

Utilizando como referencia, mediciones realizadas en la mina anteriormente en otros trabajos similares, demostraremos de forma experimental la metodología para efectuar los cálculos de las mallas a tierra. Estos son valores de resistividad reales de las SKID en el momento de la realización del trabajo.

Para los cálculos que ejemplificaran la forma de cálculo de las mallas utilizaremos el valor medido de resistividad más elevada.

La resistencia de la malla a tierra será la resistencia a tierra del cable de enlace y de todos los electrodos en paralelo. Elaboraremos el cálculo por separado de de la resistencia a tierra de los electrodos y la del cable de enlace, para luego encontrar la resistencia total o resistencia de la malla.

- ❖ Calculamos la resistencia a tierra de un electrodo.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

$R \leftrightarrow$ Resistencia a tierra de un electrodo.

$\rho \leftrightarrow$ Resistividad del terreno.

$l \leftrightarrow$ Largo del electrodo.

$$\rho = 3014,4 \Omega m$$

$$l = 3m$$

$$R = 0,9 \frac{\rho}{l} \quad (2.3)$$

$$R = 0,9 \frac{3014,4 \Omega m}{3m}$$

$$R = 904,32 \Omega$$

❖ Obtenida la resistencia a tierra de un electrodo, calculamos la resistencia de un grupo de electrodos. Asumiremos una cantidad de 56 electrodos, separados 6m y enterrados 3m de profundidad, lo cual representa un coeficiente de apantallamiento igual a 0,75 (por tabla#1, ver anexo 3).

$\eta_r \leftrightarrow$ Coeficiente de apantallamiento.

$n \leftrightarrow$ Numero de electrodos.

$$R_g = \frac{R}{n \cdot \eta_r} \quad (2.4)$$

$$R_g = \frac{904,32 \Omega}{56 \cdot 0.75}$$

$$R_g = 21.53 \Omega m$$

❖ Calculamos la resistencia a tierra del cable de enlace. Como nuestra malla esta compuesta por 56 electrodos separados a una distancia de 6m, calculamos el largo total del cable de enlace (l_{tc}):

Donde:

$l_{ch} \leftrightarrow$ Largo del cable de unión de varillas horizontales.

$l_{cv} \leftrightarrow$ Largo del cable de unión de varillas verticales.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

$$lch = 8 \cdot b = 8 \cdot 36 = 288m$$

$$lcv = 7 \cdot a = 7 \cdot 42 = 294m$$

$$ltc = lch + lcv = 582m$$

Con la resistencia a tierra del cable de enlace, calculamos la resistencia a tierra del cable de enlace (R_{ltc}) para una profundidad entre 50 y 100cm.

$$R_{ltc} = 2,1 \frac{\rho}{ltc} \quad (2.5)$$

$$R_{ltc} = 2,1 \frac{3014,4\Omega m}{582m}$$

$$R_{ltc} = 10.87\Omega$$

Resistencia a tierra real del cable de enlace, para esto debemos tener en cuenta el coeficiente de apantallamiento.

$$\eta_r = 0,19$$

$$R'_{ltc} = \frac{R_{ltc}}{\eta_r} \quad (2.6)$$

$$R'_{ltc} = \frac{R_{ltc}}{\eta_r} = \frac{10,77\Omega}{0,19}$$

$$R'_{ltc} = 56.58\Omega$$

Resistencia total de la malla a tierra.

$$R_{tm} = \frac{R_g \cdot R'_{ltc}}{R_g + R'_{ltc}} \quad (2.7)$$

$$R_{tm} = \frac{21.53\Omega \cdot 56.58\Omega}{21.53\Omega + 56.58\Omega}$$

$$R_{tm} = 15.59\Omega$$

Los cálculos demuestran al utilizar electrodos convencionales es necesario una gran cantidad de electrodos para obtener una baja resistencia en las mallas a tierra, esto encarece la construcción de las tomas de tierra debido a la cantidad de material necesario. Por los estudios antes realizados sabemos que los electrodos CHEM-ROD tienen la



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

eficiencia de 10 electrodos convencionales, por lo que la utilización de estos reducirá en gran medida los materiales y la resistencia a tierra podrá ser la deseada. (Ver tabla#2 anexo 3)



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Conclusiones Parciales.

- Se describió la línea aérea de distribución eléctrica que alimenta a la mina.
- Se realizó una nueva propuesta de configuración para las protecciones eléctricas de la línea.
- Se calcularon los valores de la malla a tierra para las protecciones.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Capítulo III

Evaluación Económica del Sistema de Protecciones.



Capítulo III: Evaluación económica del sistema de protecciones.

Introducción.

En el análisis del sistema de protección contra descargas eléctricas en las líneas aéreas de la mina, corresponde comprobar económicamente las propuestas de mejoras para disminuir las pérdidas por las afectaciones que las descargas pueden producir. Se definirán todos los gastos de la inversión a la hora de aplicar las medidas propuestas en el capítulo anterior para definir el tiempo de amortización de dichos gastos.

Las averías provocadas por las descargas atmosféricas traen aparejadas grandes pérdidas económicas. En este trabajo se determinó el impacto de las descargas atmosféricas en la productividad de la empresa, además de las pérdidas económicas por causa de reparación y sustitución de motores principalmente, aunque también han afectado transformadores en algunos casos. Consiguientemente hemos tenido en cuenta los costos de los dispositivos de protección a instalar.

3.1 Análisis económico.

El impacto directo de una descarga eléctrica en las líneas aéreas de la mina, por ejemplo la línea de yagrumaje norte, ha sacado de operación una o mas excavadoras y al mismo tiempo algún secadero. Para el caso de una excavadora principalmente es afectado el aislamiento del motor principal (motor sincrónico) y de su cable de alimentación, mientras que para los secaderos se ha afectado el aislamiento del ventilador de tiro de gases paralizándose de esta forma el propio secadero.

Al analizar los reportes de incidencias (Horas de afectación) de los últimos años, podemos observar que las pérdidas por el efecto de las descargas atmosféricas en las líneas de la mina son cuantiosas, durante los años estudiados. Los diferentes periodos de tiempo de avería en las excavadoras suman un total de 634.15 horas y en los exhausters de 166.8 horas, con sus respectivas especificaciones de mineral que no fue alimentado por las excavadoras de 81295.36 tn, en los exhausters de 3169.2 tn, pérdidas en la productividad de Níquel (Ni) 739.0487287 tn y 28.810908 tn respectivamente, y divisas no generadas



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

por causa de las averías 9339921.434605 USD en total, todos estos valores se muestran en la, ver tabla #1 Anexo 4.

Para obtener estos resultados tuvimos en cuenta que los precios del Níquel en los diferentes años variaron, en el 2006 y 2007 estaba en un promedio de 15 dólares la libra. En los años 2009 y 2010 su promedio fue de 9.93 USD por libra.

Otras de las consecuencias son los costos directos por concepto de mantenimiento, reparaciones y mano de obra necesarias para la puesta en operación de uno de estos equipos, luego de la afectación que alcanzan la cifra de 524682.81 USD. Ver tabla#2 anexo 4

Los gastos incurridos para la inversión tienen un monto de 58401.4 USD, ver tabla 3.1.

Tabla 3.1 Costos de los dispositivos de protección a instalar.

Materiales	cantidad	precio pu USD	precio total USD
Terminal ionizador de esfera erizada	30U	635	19050
Conductor de toma de tierra	200m	2.17	434
Descargadores de sobretensión 10kV	25U	182.72	4568
Descargadores de sobretensión interior	21U	164.5	3454.5
Electrodo de puesta a tierra	70U	260	18200
Salas de tratamiento del electrodo	70U	123.2	8624
Vigas de soporte	10U	152.15	1521.5
Hilo de Guarda	1050m	1.27	1333.5
Grampas de suspensión	40U	30.4	1216
Inversión total			58401.4

Los métodos usados para decidir si un proyecto debe ser o no aceptado pueden ser varios. A continuación comentamos tres de los más novedosos y de amplio uso en la actualidad.

Método del período de recuperación (tiempo de amortización): es aquel número de años que se requerirá para recuperar el monto total de la inversión original.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Método del valor presente neto (VAN): Es el valor presente de los flujos de efectivo futuro descontados al costo de capital, menos el monto de la inversión. Es una técnica del flujo de efectivo descontado.

Método de la tasa interna de rendimiento (TIR): Es la tasa de interés que iguala al valor presente de los flujos futuros de efectivo esperados con el costo inicial del proyecto. También es una técnica del flujo de efectivo descontado.

En nuestro proyecto utilizaremos el método del periodo de recuperación, y será efectuado por separado para cada uno de los años que hemos analizado. Luego obtendremos el promedio entre estos años que será el tiempo de amortización para nuestra inversión.

3.1.1 Tiempo de Amortización.

El tiempo de amortización (**Ta**) sería el resultado entre el costo de la inversión, más el 12 % de la tasa de interés y esta suma dividirla entre el costo del ahorro (Cah), esta es la energía ahorrada por concepto de disminución de pérdidas, y se calcularía por la siguiente expresión.

$$Ta = (\text{costo inversión.} + \text{Tasa de interés}) / Cah \quad (3.1)$$

El costo de la inversión (58401.4 USD) más la tasa de interés (7008.168 USD) alcanzan los 65409.568 USD.

Amortización año 2006.

Durante el año 2006 tuvimos una perdida de 5190623.19 USD por el Níquel (Ni) no producido, y 227511.94 USD por gastos de mantenimiento y mano de obra, estos representan un gasto de 5418135.13 USD.

$$Ta = \frac{\$65409.568}{\$5418135.13}$$

$$Ta = 0.01 \text{ año}$$



Año 2007.

Este año (2007) tuvimos una perdida de 1588192.701 USD por el Níquel (Ni) no producido, y 99279.54 USD por gestos de mantenimiento y mano de obra, esto representan un gasto de 1687472.241 USD.

$$Ta = \frac{\$65409.568}{\$1687472.241}$$

$$Ta = 0.03 \text{ año}$$

Año 2009.

Este año (2009) tuvimos una perdida de 2040231.245 USD por el Níquel (Ni) no producido, y 46232.96 USD por gestos de mantenimiento y mano de obra, esto representan un gasto de 2086464.205 USD.

$$Ta = \frac{\$65409.568}{\$2086464.205}$$

$$Ta = 0.03 \text{ año}$$

Año 2010.

Este año (2010) tuvimos una perdida de 1042909.9823 USD por el Níquel (Ni) no producido, y 151567.37 USD por gestos de mantenimiento y mano de obra, esto representan un gasto de 2237387.3346 USD.

$$Ta = \frac{\$65409.568}{\$2237387.3346}$$

$$Ta = 0.03 \text{ año}$$

De esta forma podemos decir que nuestra inversión tendrá un periodo de amortización aproximado de 0.03 año, esto demuestra que la inversión será recuperada brevemente, prácticamente con una de las averías de mayor impacto se recupera la inversión. Aunque lo más importante es proteger el equipamiento.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Conclusiones Parciales.

- Se determinó el costo general de la inversión en un valor de \$58401.4 USD.
- Se evaluó la amortización de la inversión comparándola con las pérdidas en que se incurren producto a las fallas provocadas por descargas atmosféricas, comprobando que este tiempo es bastante pequeño, para cualquiera de los años 4 años en que se evaluó.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Conclusiones Generales.

- Se realizó un análisis resumen de las protecciones contra descargas atmosféricas más utilizadas, demostrando su evolución en el transcurso del tiempo.
- Se describió las características de la línea y de la protección contra descargas atmosféricas instaladas, demostrando que estas no cumplen los parámetros técnicos necesarios para un eficiente sistema de protección.
- Se diseño y propuso la configuración de un nuevo sistema de protecciones contra descargas atmosféricas.
- Se determino el costo total del nuevo sistema de protecciones en 58401.4 USD y su corto plazo de amortización.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Recomendaciones.

- Realizar mediciones periódicas de las mallas de tierra atendiendo al continuo movimiento de las mismas y a la alta y variable resistividad del terreno.
- Efectuar un estudio de las proyecciones de minería, para determinar la futura ubicación de las líneas y poderlas proteger eficazmente.
- Que se valore con la dirección de la empresa las medidas propuestas en el presente trabajo con el objetivo de su aplicación, atendiendo a los beneficios que estas podrían brindarle.
- Instalar contadores de descargas en los descargadores valvulares para tener un registro más exacto de las descargas atmosféricas.



Bibliografía.

- [1] Carpenter, Roy B. "Lightning Prevention for Transmission and Distribution Systems", American Power Conference, Chicago, Vol. 49, 1987.
- [2] Carpenter, Roy B. Los efectos secundarios derivados de la actividad eléctrica atmosféricas. 1992.
- [3] Carpenter, Roy B. "New and More Effective Strike Protection for transmission Distribution Systems", 1992.
- [4] Enríquez Harper, Gilberto. Fundamentos de instalaciones eléctricas de media y alta tensión. México: Editorial Limusa, s.a.
- [5] Hermoso, B; Martínez del Cid. Protección contra el rayo en redes eléctricas de media y baja tensión. España: Iberdrola, Universidad Publica de Navarra, 1996.
- [6] Hermoso, B; Martínez del Cid. Riesgos por impactos de rayos en las instalaciones eléctricas, montajes e instalaciones. 1998.
- [7] Instituto de Investigación Tecnológica-Unión Fenosa. Utilización del hilo de guarda en líneas de 69 KV. Madrid. 2000.
- [8] Lightning Protection Manual for Rural Electric Systems, NRECA Proyecto de Investigación 82-5, 1983, REA Washington DC.
- [9] "Lightning Strike Protection Criteria, Concepts and Configuration", Report N° LEC-01-86, Revised 1993.
- [10] Martínez Lozano, Miguel. Guía para la protección contra descargas Atmosféricas (Rayos), Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela, Noviembre 2004,
- [11] Martínez Velasco, Juan A. Cálculo de sobretensiones en sistemas eléctricos, (curso sobre coordinación de aislamiento en alta tensión), Madrid, 1999.
- [12] Merrit, S. Design Charts to Relate Transmission Line Parameters to Flashover Probability", Union Camp Paper, Franklin, VA, 1988.
- [13] Protección contra descargas atmosféricas y ruidos eléctricos. Mónico SLR. Buenos Aires, argentina.
- [14] Proyecto de Descargas Atmosféricas. Auditorio universidad Central, San José, Costa Rica 2005.
- [15] Rodríguez Montes, Ángel. Rayos No, gracias. www.pararrayos.org. (abril 2011)



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

- [16] Torres H. “Qué tan eficaces son los modernos dispositivos no convencionales de protección contra rayos”, Revista AEIUN, (Bogotá), julio 2000.
- [17] Uman, Martin. “The Lightning Discharge”. Academic Press, 1987.
- [18] Instituto de investigación Tecnológica-Unión Fenosa, Protección frente a sobretensiones de origen atmosférico. Madrid: s.e., 1996.
- [19] Un nuevo enfoque a las protecciones contra descargas eléctricas atmosféricas para líneas de transmisión y distribución. [www. Lecmex.com](http://www.Lecmex.com).



Anexo 1

Características de funcionamiento de los descargadores valvulares.

La firma Oerlikon utiliza el soplado magnético en sus descargadores autovalvulares. Efectivamente, el explosor de autoextinción utilizado en los descargadores clásicos no es suficiente si estos dispositivos están sometidos a condiciones de funcionamiento muy desfavorables, por ejemplo, en caso de corte de líneas de gran longitud en vacío. En estos casos, las corrientes de fuga adquieren valores que el explosor de autoextinción no puede tolerar. Por lo tanto, hay que recurrir a un explosor que, por una parte, satisfaga las condiciones normales, tales como tensión de cebado, etc... Y, por otra parte, pueda cortar una elevada corriente de fuga.

El único medio viable es el soplado del arco y de sus raíces, por medio de un campo magnético propio o exterior. El desplazamiento de las raíces del arco limita el calentamiento local del explosor, de forma que no hay quemado de los electrodos ni formación de perlas. Además, el medio ambiente refrigera enérgicamente el arco lo que, por el forzado equilibrio de las temperaturas, eleva la tensión del arco.

En principio, son aplicables los dos sistemas siguientes:

a) Un soplado relativamente débil que solamente consigue desplazar el arco fuera del sitio de cebado. De ello resulta una refrigeración del arco que permite cortar corrientes de fuga más elevadas que con el explosor de autoextinción.

b) Un soplado enérgico que además de desplazar el arco, consigue alargarlo. Este alargamiento eleva la tensión del arco, que se opone a la tensión nominal con lo que se obtiene una notable reducción de la corriente de fuga, lo que facilita su paso por la resistencia variable.

El dispositivo Oerlikon aplica un fuerte soplado del arco. El campo magnético de soplado es producido por bobinas dispuestas a una y otra parte de las placas de las cámaras de extinción; estas bobinas están protegidas por un explosor en paralelo.

Características de funcionamiento de los descargadores.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

A continuación, definiremos las magnitudes que caracterizan los descargadores; estas definiciones están basadas en las recomendaciones del Comité Electrotécnico Internacional. Debe tenerse en cuenta que el conocimiento de todas estas magnitudes es indispensable para juzgar las cualidades de un descargador.

Tensión nominal: Es el valor eficaz más elevado de la tensión admitido entre los bornes del descargador, a la frecuencia nominal. Por lo tanto, la tensión nominal de un descargador coincide con el valor de la tensión máxima de servicio.

Tensión de cebado: A la frecuencia de servicio. No es deseable que el descargador se cebé frecuentemente con sobretensiones de origen interno, que pueden soportar perfectamente los aparatos. Por lo tanto, está previsto que un descargador pueda recibir sin cebarse estos impactos de tensión para valores de ésta que sean 1,5 veces inferiores a la tensión nominal del descargador.

Tensión de cebado al choque: En este caso, se hace distinción entre la tensión 100 % de cebado al choque que y la tensión de cebado en el frente de la onda. La primera es el valor de cresta de la tensión de choque de 1/50'microsegundos para la cual, el descargador se ceba 5 veces de cada 5. La tensión de cebado en el frente es el valor más elevado de la tensión de cebado que es medida en caso de cebado en el frente de una tensión de choque de cierta forma y de cierto valor.

Tensión residual: Es la tensión que aparece en los bornes del descargador cuando la corriente de descarga alcanza el valor de la corriente nominal.

Corriente de descarga nominal: Es la amplitud de la corriente de choque para la cual se dimensiona el descargador. El descargador autovalvular debe poder descargar esta corriente un número ilimitado de veces, sin sufrir avería. La variación temporal difiere, según las prescripciones en distintos países, entre 8... 20 y 12. ... 45 microsegundos.

Corriente de descarga máxima: Es la corriente máxima de choque que el descargador puede descargar con seguridad. En la mayor parte de los casos, el valor exigido es de 100kA para una forma de onda de 5/10 microsegundos. Desde hace algún tiempo, se



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

exige también una corriente de descarga máxima para choques rectangulares de larga duración, por ejemplo, 2.000 microsegundos.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Anexo 2

Consideraciones Para el Diseño de una Puesta a Tierra

Resistividad del terreno.

Resistencia a tierra deseada del electrodo de tierra.

Tensión de paso y contacto.

Parámetros de los que depende la resistividad del terreno.

La resistividad del terreno, es un factor importante en el valor de la resistencia de puesta a tierra, la cual depende, además del tipo de terreno, de varios parámetros, entre los que se pueden encontrar los siguientes:

Humedad del terreno.

Salinidad del terreno.

Granulometría del terreno.

Temperatura del terreno.

Según la conformación de los suelos, estos presentan diferentes resistividades. Les brindamos la resistividad de algunos terrenos naturales a continuación en la tabla de suelos con sus respectivas resistividades.

Naturaleza del Terreno	Resistividad en Ω - m
Terrenos Pantanosos	De algunas unidades a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba Húmeda	5 a 100
Arcilla Plástica	Hasta 50
Marga y Arcillas Compactas	100 a 200
Margas del jurásico	30 a 40
Arena Arcillosa	50 a 500
Arena Silíceas	200 a 300
Suelo Pedregoso Cubierto de Césped	300 a 500



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Suelo Pedregoso Desnudo	1500 a 3000
Calizas Blandas	100 a 300
Calizas Compactas	1000 a 5000
Calizas Agrietadas	500 a 1000
Pizarras	50 a 300
Roca de Mica y Cuarzo	Hasta 800
Granitos y Gres procedente de alteración.	1500 a 10000
Granitos y gres muy alterado	100 a 600
Roca Ígnea.	5000 a 15000

MÉTODOS PARA LA REDUCCIÓN DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA

Existen distintos métodos para lograr la reducción de la resistencia eléctrica, aunque todos ellos presentan un punto de saturación que es conveniente conocer para evitar diseños antieconómicos. Los métodos para la reducción son los siguientes:

- a)- El aumento del número de electrodos en paralelo
- b)- El aumento de la distancia entre ejes de los electrodos
- c)- El aumento de la longitud de los electrodos.
- d)- El aumento del diámetro de los electrodos
- e)- El cambio del terreno existente por otro de menor resistividad.
- f)- El tratamiento químico electrolítico del terreno.

El aumento del número de electrodos en paralelo.

- La acción de aumentar el número de electrodos conectados en paralelo disminuye el valor de la "Resistencia Equivalente", pero esta reducción no es lineal puesto que la curva de reducción tiene tendencia asintótica a partir del 6to. ó 7mo. electrodo y además existe el fenómeno de la resistencia reciproca.

Suponiendo un medio ideal (300Ω) y según la ecuación de sumatoria de resistencias en paralelo, al aumentar un electrodo (el segundo) obtendríamos aproximadamente 150Ω al aumentar un tercero 100 y para llegar a 5Ω tendríamos que clavar 60 electrodos.

El aumento de la longitud y el diámetro de los electrodos.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

La longitud del electrodo esta en función a la resistividad y profundidad de las capas del terreno, obviamente se prefiere colocar el electrodo dentro de la capa de menor resistividad.

Por otro lado debemos indicar antes de proseguir con las demás variables que los resultados están ligados íntimamente a la resistividad del terreno donde se está trabajando, teniendo valores variables entre 200 a 600 Ω -m en condiciones normales, si aplicamos la fórmula de la Resistencia: $R = (\rho/2\pi l) * \ln (2l/d)$ en el mejor de los casos conseguiremos una Resistencia de $\approx 0.5\rho$ con un electrodo de dimensiones comunes y usuales; luego al aplicar la reducción recomendada se podrá llegar en el mejor de los casos a $\approx 0.1\rho$ lo cual en la práctica nos resulta un valor de aproximadamente 20 Ω para el caso más favorable; siendo este valor muy alto para Sistemas de Tierra usados en Pararrayos, Centros de Cómputo y Telefonía.

El aumento en el diámetro del electrodo tiene que ser mayúsculo para que su aporte reduzca significativamente la resistencia, debido a que en la fórmula de la resistencia el producto de la longitud x el diámetro del electrodo se multiplica por un logaritmo natural.

El aumento de la distancia entre ejes de los electrodos.

Normalmente la distancia entre ejes de los electrodos debe ser $\geq 4L$ siendo L la longitud del electrodo; pero en los casos donde se requiera obtener resistencias eléctricas muy bajas y exista disponibilidad de área de terreno, las distancias entre ejes de los electrodos, deberán ser lo máximo posible; pues a mayor distancia entre ejes de electrodos, mayor será la reducción de la resistencia a obtener; y ello por el fenómeno de la resistencia mutua entre electrodos.

Cambio del Terreno

Los terrenos pueden ser cambiados en su totalidad, por terreno rico en sales naturales; cuando ellos son rocosos, pedregosos, calizas, granito, etc., que son terrenos de muy alta resistividad y pueden cambiarse parcialmente cuando el terreno está conformado por componentes de alta y baja resistividad; de modo que se supriman las partes de alta resistividad y se reemplacen por otros de baja resistividad; uno de estos procedimientos es el zarandeo del terreno donde se desechan las piedras contenidas en el terreno.

El cambio total parcial del terreno deberá ser lo suficiente para que el electrodo tenga un radio de buen terreno que sea de 0 a 0.50 m en todo su contorno así como en su fondo.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

La resistencia crítica de un electrodo se encuentra en un radio contorno que va de 0 a 0.5 m de este, por lo que se tendrá sumo cuidado con las dimensiones de los pozos para los electrodos proyectados.

El % de reducción en estos casos es difícil de deducir, debido a los factores que intervienen, como son resistividad del terreno natural, resistividad del terreno de reemplazo total ó parcial, adherencia por la compactación y limpieza del electrodo, pero daremos una idea porcentual más menos en función al tipo de terreno y al cambio total ó parcial.

Para lugares de alta resistividad donde se cambie el terreno de los pozos en forma total, el porcentaje puede estar entre 50 a 70 % de reducción de la resistencia eléctrica resultante.

Para terrenos de media resistividad donde se cambie el terreno de los pozos en forma parcial ó total, el porcentaje de reducción puede estar como sigue:

- Cambio parcial de 20 a 40 % de reducción de la resistencia eléctrica resultante.
- Cambio total de 40 a 60 % de reducción de la resistencia eléctrica resultante.

Para terrenos de baja resistividad donde se cambiará el terreno de los pozos en forma parcial, el porcentaje de reducción puede estar entre 20 a 40 % de la resistividad natural del terreno.

La saturación en este caso se dará si cambiamos mayor volumen de tierra que la indicada, los resultados serán casi los mismos y el costo será mucho mayor, lo cual no se justifica.

TRATAMIENTO QUÍMICO DEL SUELO

El tratamiento químico del suelo surge como un medio de mejorar y disminuir la resistencia eléctrica del SPAT sin necesidad de utilizar gran cantidad de electrodos.

Para elegir el tratamiento químico de un SPAT se deben considerar los siguientes factores:

- Alto % de reducción inicial
- Facilidad para su aplicación
- Tiempo de vida útil (del tratamiento y de los elementos del SPAT)



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

-Facilidad en su reactivación

-Estabilidad (mantener la misma resistencia durante varios años)

Las sustancias que se usan para un eficiente tratamiento químico deben tener las siguientes características:

- Higroscopicidad -Alta capacidad de Gelificación

- No ser corrosivas -Alta conductividad eléctrica

-Químicamente estable en el suelo -No ser tóxico

- Inocuo para la naturaleza

TIPOS DE TRATAMIENTO QUÍMICO

Existen diversos tipos de tratamiento químico para reducir la resistencia de un SPAT los más usuales son:

- Cloruro de Sodio + Carbón vegetal

- Bentonita

- Thor-Gel

Características principales de los tratamientos químicos

Ninguna Sal es estado seco en conductiva, para que los electrolitos de las sales conduzcan corriente, se deben convertir en soluciones verdaderas o en pseudo soluciones, por ejemplo: el cloruro de sodio en agua forma una solución verdadera lo mismo que el azúcar, el mismo cloruro de sodio disuelto en benzeno formara una pseudo solución o dispersión coloidal como también se le conoce.

Cloruro de Sodio + Carbón Vegetal

El Cloruro de Sodio forma una solución verdadera muy conductiva que se precipita fácilmente junto con el agua por efecto de la percolación, capilaridad y evapotranspiración; la solución salina tiene una elevada actividad corrosiva con el electrodo, reduciendo ostensiblemente su tiempo de vida útil, la actividad corrosiva se acentúa si el electrodo es de hierro cobreado (copperweld). Si bien es cierto que el cloruro de sodio disuelto en agua no corroe al cobre (por ser un metal noble) no es menos cierto que la presencia de una corriente eléctrica convertirá al sistema, Cobre - solución cloruro de sodio, en una celda electrolítica con desprendimiento de cloro y formación de hidróxido de sodio en cuyo caso ya empieza la corrosión del cobre.

El objetivo de la aplicación del carbón vegetal molido (cisco de carbonería) es aprovechar la capacidad de este para absorber la humedad del medio, (puesto que el carbón vegetal



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

seco es aislante) y retener junto a esta algunos de los electrolitos del cloruro de sodio que se percolan constantemente.

Bentonita

Las bentonitas constituyen un grupo de sustancias minerales arcillosas que no tienen composición mineralógica definida y deben su nombre al hecho de haberse descubierto el primer yacimiento cerca de Fort Benton, en los estratos cretáceos de Wyoming en 1848; Aun cuando las distintas variedades de bentonitas difieren mucho entre sí en lo que respecta a sus propiedades respectivas, es posible clasificarlas en dos grandes grupos:

- Bentonita Sódica.- En las que el ion sodio es permutable y cuya característica más importante es una marcada tumefacción o hinchamiento que puede alcanzar en algunas variedades hasta 15 veces su volumen y 5 veces su peso

- Bentonita Cálcica.- En las que el ion calcio es permutable, tiene menor capacidad para absorber agua y por consiguiente solo se hinchan en la misma proporción que las demás arcillas.

Las bentonitas molidas retienen las moléculas del agua, pero la pierden con mayor velocidad con la que la absorben debido a la sinéresis provocada por un exiguo aumento en la temperatura ambiente, al perder el agua pierden conductividad y restan toda compactación lo que deriva en la pérdida de contacto entre el electrodo y el medio, elevándose la resistencia del pozo ostensiblemente, una vez que la Bentonita se ha armado, su capacidad de absorber nuevamente agua es casi nula.

THOR-GEL

Es un compuesto químico complejo que se forma cuando se mezclan en el terreno las soluciones acuosas de sus 2 componentes. El compuesto químico resultante tiene naturaleza coloidal, formando una malla tridimensional, que facilita el movimiento de ciertos iones dentro de la malla, de modo que pueden cruzarlo en uno u en otro sentido; convirtiéndose en un excelente conductor eléctrico.

Tiene una gran atracción por el agua, de modo que puede aprisionarla manteniendo un equilibrio con el agua superficial que la rodea; esto lo convierte en una especie de reservorio acuífero.



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Rellena los espacios intersticiales dentro del pozo, constituyendo una excelente conexión eléctrica entre el terreno (reemplazado) y el electrodo, asegurando una conductividad permanente.



Anexo 3

Tabla#1 Determinación del factor de acople según la cantidad de electrodos y su separación.

Distancia d m	Número de varillas N										
	5	12	16	20	24	30	36	40	46	50	56
9	0,94	0,9	0,88	0,86	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
6	0,9	0,85	0,82	0,8	0,78	0,77	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
3	0,75	0,67	0,64	0,62	0,6	0,58	0,57	0,56	0,55	0,54	0,54

Tabla#2 Comparación de electrodos.

Tipo de Electrodo	Resistencia de Terreno (Ohm-metro)				
	9	62	270	3.7 K	30 K
Chem-Rod	0.2	<2.0	<10	<90	<1K
Varillas	7.2	>22	65	430	<10K



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Anexo 4

Tabla #1 horas de averías y perdidas en las excavadoras y los exhausters.

Excavadora	Horas de Averías (h)	Productividad Real de las Excavadoras (tn/h)	Mineral no alimentado	Perdida producción De Ni. (tn)	Divisas no Generadas (USD)
2006					
DA-1	3.37	128	431.36	3.9214545	58821.8175
	4.37	128	559.36	5.0850909	76276.3635
	5.37	128	687.36	6.24872727	93730.90905
	6.37	128	815.36	7.4123636	111185.454
	39.22	128	5020.16	45.637818	684567.27
	0.45	128	57.6	0.5236364	7854.546
	16.35	128	2092.8	19.0254546	285381.8175
DA-2	5.45	128	697.6	6.3418182	95127.273
DA-3					
	4.23	128	541.44	4.9221818	73832.727
	0.45	128	57.6	0.5236364	7854.546
DA-4					
	68.08	128	8714.24	79.220364	1188305.46
	2.15	128	275.2	2.5018182	37527.273
	12.15	128	1555.2	14.138182	212072.73
DA-5					
	46.42	128	5941.76	54.016	810240
	21.08	128	2698.24	24.529455	367941.825
	0.45	128	57.6	0.5236364	7854.546
	16.35	128	2092.8	19.025455	285381.818
DA-6					
	3.37	128	431.36	3.9214545	58821.8175
	0.45	128	57.6	0.5236364	7854.546
	25.08	128	3302.4	30.021818	450317.727
	1.2	128	153.6	1.3963636	20945.454



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Total	282.41		36240.64	293.597092	4941895.92
2007					
DA-1					
	23.1	128	2956.8	26.88	403200
	12.25	128	1600	14.545455	14.545455
DA-5					
	2	128	256	2.3272727	34909.0905
	12.11	128	1550.08	14.091636	211374.54
DA-6					
	23.1	128	2956.8	26.88	403200
	20.17	128	2581.76	23.470545	352058.175
Total	92.73		11901.44	108.1949	1404756.351
2009					
DA-1					
	41.15	128	5267.2	47.883636	475484.5055
DA-2					
	70.3	128	8998.4	81.803636	812310.1055
DA-5					
	63.3	128	8102.4	73.658182	731425.7473
Total	174.75		22368	203.345454	2019220.358
2010					
DA-1					
	1.29	128	165.12	1.5010909	14905.83264
	5.14	128	657.92	5.9810909	59392.23264
	1.21	128	154.88	1.408	13981.44
	4.06	128	519.68	4.7243636	46912.93055
	1.49	128	190.72	1.7338182	17216.81473
	32	128	4096	37.236364	369757.0945
	4.02	128	514.56	4.6778182	46450.73473
DA-2					
	1.56	128	199.68	1.8152727	18025.65791
	1.1	128	140.8	1.28	12710.4
	4.09	128	523.52	4.7592727	47259.57791
	1.4	128	179.2	1.6290909	16176.87264



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

DA-5					
	1.56	128	199.68	1.8152727	18025.65791
	1.1	128	140.8	1.28	12710.4
	4.09	128	523.52	4.7592727	47259.5779
	1.4	128	179.2	1.6290909	16176.8726
DA-6					
	1.29	128	165.12	1.5010909	14905.83264
	6.14	128	785.92	7.1447273	70947.14209
	1.21	128	154.88	1.408	13981.44
	4.06	128	519.68	4.7243636	46912.93055
	2	128	256	2.3272727	23109.81791
	4.05	128	518.4	4.7127273	46797.38209
Total	84.26		10785.28	98.048	973616.6419
2006					
exhauster					
Exha 1					
	1	19	19	0.17272727	2590.90905
Exha 2					
	1	19	19	0.17272727	2590.90905
Exha 3					
	1	19	19	0.17272727	2590.90905
	6.34	19	120.46	1.0950909	16426.3635
	33.37	19	634.03	5.763909	86458.635
Exha 4					
	1	19	19	0.17272727	2590.90905
Exha 6					
	9.34	19	177.46	1.6132727	24199.0905
	0.4	19	7.6	0.0690909	1036.3635
	42.55	19	808.45	7.34954545	110243.182
Total	96		1824	16.581818	248727.27
2007					
Exha 5	16.26	19	308.94	2.808545	42128.175
	7.04	19	133.76	1.216	1824



Modificación del sistema de protección contra descargas atmosféricas en la línea aérea que alimenta la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Exha 6	35.15	19	667.85	6.0713636	91070.454
Exha 2	12.35	19	234.65	2.1331818	31997.727
Total	70.8		1345.2	12.22909	183436.35
2009					
Exha 4	12.25	19	232.75	2.1159	21010.887
Total	12.25		232.75	2.1159	21010.887
2010					
Exha 1	5.3	19	100.7	0.9154545	9090.46319
Exha 2	24.45	19	464.55	4.2231818	41936.1953
Exha 5	4.45	19	84.55	0.077727	771.82911
Exha 6	10.2	19	193.8	1.761818	17494.8527
Total	44.4		843.6	6.8781813	69293.3403

Tabla #2 Gastos de mano de obra y mantenimiento.

2006	gastos de mantenimiento		gastos de mano de obra				
materiales	cantidad	precio unitario	mecánico	salario \$/h	eléctrico	salario \$/h	cost. Total (\$)
motor sincrónico excav	8U	4447.39	4	1.49	1	1.49	35608.92
cable de alimentación	250m	33			4	1.49	8273.84
teype	230m	2.4			2	1.49	554.98
mango para empalme	92U	7.2					662.4
motor sincrónico exhau	6U	30397	4	1.49	1	1.49	182411.8
Total							227511.94
2007							
materiales							
motor sincrónico escav	4U	4447.39	4	1.49	1	1.49	17819.36

[illegible]

