



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

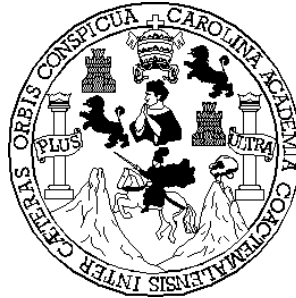
**IMPLEMENTACIÓN DE PARARRAYOS EN LA LÍNEA 230 KV
BRILLANTES - LA ESPERANZA PARA REDUCIR SALIDAS
FORZADAS POR DESCARGAS ELECTROATMOSFÉRICAS**

DANIEL ERNESTO ZAPATA GARCÍA

Asesorado por Ing. José Guillermo Bedoya Barrios

Guatemala, septiembre de 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**IMPLEMENTACIÓN DE PARARRAYOS EN LA LÍNEA 230 KV
BRILLANTES – LA ESPERANZA PARA REDUCIR SALIDAS
FORZADAS POR DESCARGAS ELECTROATMOSFÉRICAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

DANIEL ERNESTO ZAPATA GARCÍA

ASESORADO POR ING. JOSÉ GUILLERMO BEDOYA BARRIOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing.	Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing.	Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic.	Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing.	Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br.	Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br.	Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing.	Pedro Antonio Aguilar Polanco

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing.	Herbert René Miranda Barrios
EXAMINADOR	Ing.	José Luis Herrera Gálvez
EXAMINADOR	Ing.	Saúl Cabezas Durán
EXAMINADOR	Ing.	Carlos Humberto Pérez Rodríguez
SECRETARIO	Inga.	Gilda Marina Castellanos Baiza de Illescas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**IMPLEMENTACIÓN DE PARARRAYOS EN LA LÍNEA 230 KV
BRILLANTES – LA ESPERANZA PARA REDUCIR SALIDAS
FORZADAS POR DESCARGAS ELECTROATMOSFÉRICAS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica con fecha 9 de febrero de 2,004.

Daniel Ernesto Zapata García

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
GLOSARIO.....	VII
RESUMEN.....	IX
OBJETIVOS.....	XI
HIPÓTESIS.....	XII
INTRODUCCIÓN.....	XIII
1. ANÁLISIS DE LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO DE DISEÑO DE LA LÍNEA 230 KV BRILLANTES – LA ESPERANZA	1
1.1. Importancia de la línea 230 kV Brillantes – La Esperanza.....	1
1.2. Descripción de la línea de transmisión.....	2
1.3. Verificación del aislamiento de diseño.....	2
1.3.1. Voltaje de flameo en seco.....	4
1.3.2. Distancia de fuga.....	4
1.3.3. Nivel básico de aislamiento BIL.....	6
1.4. Verificación del blindaje de diseño.....	8
1.5. Verificación de la red de puesta a tierra.....	13
1.5.1. Voltajes que aparecen durante una descarga.....	14
1.51.1. Voltaje en la parte superior o punta de la estructura.....	15
1.5.1.2. Voltaje de flameo inverso en los aisladores de la línea.....	16
1.5.2. Corriente de rayo que produce flameo inverso.....	17

1.6.	Métodos para mejorar la actuación de una línea de transmisión.....	18
1.6.1.	Distancia de aislamiento.....	18
1.6.2.	Blindaje.....	19
1.6.3.	Sistema de tierras.....	20
1.6.3.1.	Electrodos de tierra.....	20
1.6.3.2.	Contrantenas.....	20
1.6.4.	Implementación de pararrayos.....	21
2.	ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE INTERVIENEN EN LAS SALIDAS FORZADAS DE LA LÍNEA 230 KV BRILLANTES – LA ESPERANZA.....	23
2.1.	Registro de aperturas en la línea Brillantes – La Esperanza.....	23
2.2.	Niveles cerámicos.....	25
2.2.1.	Concepto de nivel cerámico.....	26
2.2.2.	Concepto de densidad de rayos a tierra.....	26
2.3.	Corriente de rayo.....	28
2.3.1.	La distribución probabilística de las corrientes de rayo.....	28
2.3.2.	Forma de onda de la corriente de rayo y sus efectos.....	29
2.4.	Efectos en el aislamiento debido a la altitud de operación de la línea	31
2.5.	Influencia de los agentes contaminantes en el aislamiento de la línea	32
3.	ESPECIFICACIÓN TÉCNICA Y SELECCIÓN DE LOS PARARRAYOS PARA LA LÍNEA 230 KV BRILLANTES – LA ESPERANZA.....	33
3.1.	Naturaleza de los sobrevoltajes.....	33
3.1.1.	Sobrevoltajes temporales.....	34
3.1.2.	Sobrevoltajes transitorios.....	36
3.1.2.1.	Sobrevoltajes transitorios de frente lenta.....	36
3.1.2.2.	Sobrevoltajes transitorios de frente rápida.....	37
3.1.2.3.	Sobrevoltajes transitorios de frente muy rápida..	37

3.1.2.4.	Sobrevoltajes transitorios combinados.....	38
3.2.	Descargas electroatmosféricas en líneas de transmisión.....	38
3.3.	Pararrayos.....	40
3.3.1.	Pararrayos de carburo de silicio (SiC).....	41
3.3.2.	Pararrayos de óxido de zin (ZnO) sin centelladores.....	42
3.4.	Principio de funcionamiento de los pararrayos de línea.....	44
3.5.	Criterios para la selección de pararrayos poliméricos de línea.....	46
3.6.	Especificaciones técnicas y selección del pararrayos para la línea 230 kV Brillantes – La Esperanza.....	47
4.	MÉTODOS PARA LA INSTALACIÓN DE PARARRAYOS EN LA LÍNEA 230 KV BRILLANTES – LA ESPERANZA.....	55
4.1.	Instalación de pararrayos en estructuras ubicadas en regiones con suelos de elevada resistividad.....	56
4.2.	Instalación de pararrayos en estructuras ubicadas en regiones montañosas.....	56
4.3.	Instalación de pararrayos en estructuras próximas a subestaciones.....	57
4.4.	Instalación de pararrayos en líneas nuevas sin cables de guarda.....	57
4.4.1.	Configuración vertical.....	58
4.4.2.	Configuración horizontal.....	59
4.4.3.	Configuración triangular.....	59
4.5.	Instalación de pararrayos en líneas existentes con o sin cables de guarda.....	59
4.6.	Métodos considerados para la instalación de pararrayos en la línea Brillantes – La Esperanza.....	61

4.6.1.	Implementación de pararrayos en todos los postes tipos “S1” y “S2”	61
4.6.2.	Implementación de pararrayos en postes previamente definidos tipos “S1” y “S2”	62
5.	ANÁLISIS ECONÓMICO DEL MONTAJE DE PARARRAYOS EN LA LÍNEA 230 KV BRILLANTES – LA ESPERANZA.....	65
5.1.	Consideraciones básicas.....	65
5.2.	Valor presente de la inversión en pararrayos y anualidad.....	66
5.3.	Resultados.....	68
5.4.	Análisis.....	68
	CONCLUSIONES.....	71
	RECOMENDACIONES.....	73
	BIBLIOGRAFÍA.....	75
	APÉNDICE..	77

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Gráfica para la verificación del ángulo de blindaje	9
2	Configuración básica de un poste de suspensión, línea 230 kV Brillantes - La Esperanza	11
3	Distribución de la corriente de rayo en el hilo de guarda y la estructura	15
4	Gráfica de la probabilidad P(i) de ocurrencia de una corriente de rayo I en kA	28
5	Representación de las clases y formas de onda de sobrevoltajes	38
6	Sobretensión de frecuencia fundamental versus tiempo	50
7	Diferentes tipos de estructuras y disposición de los conductores	58

TABLAS

I.	Especificaciones eléctricas del aislador polimérico tipo poste de diseño	3
II.	Especificaciones eléctricas del aislador polimérico tipo suspensión de diseño	3
III.	Nivel de contaminación y líneas de fuga para aislamientos exteriores	5
IV.	Factor de corrección que se aplica al BIL por efecto de la altitud	7
V.	Corrientes típicas de rayo y voltajes que aparecen en el conductor de descarga de la línea Brillantes - La Esperanza, para $Z_c = 398 \Omega$	13

VI.	Magnitudes de corriente de rayo que producen flameo inverso para diferentes resistencias al pie de la estructura	17
VII.	Registro de aperturas en la línea Brillantes - La Esperanza	24
VIII.	Niveles cerámicos para la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza y sus correspondientes densidades de rayos a tierra	27
IX.	Porcentajes de longitud estimada asociados a cada nivel cerámico de la línea Brillantes - La Esperanza	30
X.	Cantidad de rayos al año para cada nivel cerámico de la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza	30
XI.	Valores típicos de los factores de aterramiento	35
XII.	Características eléctricas de pararrayos	49
XIII.	Características eléctricas para solicitar el pararrayos de la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza	54
XIV.	Costos totales para la implementación de pararrayos por cada método propuesto	66
XV.	Inversión y renta anual (A) para $n = 30$ años e interés del 10%	67
XVI.	Resultados para cada procedimiento propuesto	68
XVII.	Costos totales por indisponibilidades y generación no vendida	80
XVIII	Resumen de beneficios que se obtienen con el montaje de pararrayos	81

GLOSARIO

Aislamiento polimérico	Asilamiento cuyo exterior es de material epóxico o goma de silicón y su interior es un núcleo de fibra de vidrio.
Apertura de línea	Estado de no conducción de una línea de transmisión que puede ser a causa de una falla o de forma programada.
Blindaje	Protección que utilizan las líneas de transmisión contra las descargas electroatmosféricas por medio de los cables de guarda.
Descarga disruptiva	Nivel de voltaje que produce flameo en un aislamiento.
Flameo	Estado de un aislamiento en el cual existe conducción y por lo tanto se produce una falla.
Línea de transmisión	Medio que sirve para trasportar la potencia eléctrica entre dos puntos y que físicamente esta compuesta por conductores, aislamiento, soportes y herrajes.
Nivel cerámico	Valor que indica el número promedio de días con tormenta al año en una región particular.

Pararrayos	Dispositivo de protección contra sobrevoltajes, cuya función es reducir la amplitud de los mismos.
Salida forzada	Falla en una línea de transmisión o en los sistemas eléctricos de potencia en general que se origina por cualquier circunstancia que no sea programada.
Sobrevoltaje	Variación repentina de voltaje con relación a un nivel establecido y que afecta a los sistema eléctricos de potencia.
Termografía infrarroja	Medición de los niveles de temperatura en cualquier superficie mediante la aplicación de rayos infrarrojos.

RESUMEN

Las salidas forzadas de líneas de transmisión representan una reducción en la confiabilidad, disponibilidad y calidad de los sistemas eléctricos de potencia, cuyos efectos son muy costosos, tanto para la empresa que presta el servicio como para la sociedad en general.

Las descargas electroatmosféricas son la principal causa de falla en las líneas de alto voltaje, por lo que es necesaria una efectiva coordinación del aislamiento en su diseño.

Cuando la coordinación de aislamiento presenta deficiencias para la protección, se requiere la implementación de mejoras que aumenten el desempeño en la actuación contra las descargas electroatmosféricas.

La instalación de pararrayos representa el método que técnicamente resulta más eficiente para reducir las salidas forzadas (con tendencia a cero) que se originan por la caída de rayos de forma directa o indirecta sobre las líneas. La adecuada ubicación de las estructuras y fases a proteger con pararrayos, aumenta la eficiencia del sistema de transporte de energía, además genera ahorros durante la vida útil de dichos dispositivos.

El estudio para la selección y especificación de los pararrayos a implementar en la línea 230 kV Brillantes – La Esperanza es indispensable, ya que es la de mayor importancia, ya que transporta la potencia eléctrica al Occidente de Guatemala, por lo que se requiere que siempre esté disponible.

El análisis económico demuestra que con una estratégica instalación de pararrayos en la línea 230 kV Brillantes – La Esperanza, es posible obtener ahorros económicos para la empresa propietaria de la red de transporte, adicionales a los beneficios técnicos que siempre se alcanzan.

OBJETIVOS

General

Especificar técnicamente los pararrayos a implementar en cualquier línea de 230 kV así como evaluar económicamente diferentes opciones de montaje

Específicos

1. Analizar los sobrevoltajes que se presentan en los sistemas eléctricos de potencia
2. Estudiar los efectos que representan las descargas electroatmosféricas en las líneas de transmisión
3. Analizar la operación de los pararrayos
4. Diferenciar la terminología de los pararrayos
5. Implementar pararrayos de línea en la línea 230 kV Brillantes – La Esperanza
6. Evaluar si se justifica económicamente el montaje de pararrayos en la línea 230 kV Brillantes – La Esperanza

HIPÓTESIS

El costo que representa la adquisición de los pararrayos para líneas de transmisión puede ser compensado, si se toma en cuenta que el sistema de transporte eléctrico aumenta en confiabilidad y disponibilidad, con lo cual se garantiza el servicio eléctrico de forma continua, para la prestación de los servicios básicos, como por ejemplo hospitales, aeronáutica, navegación, cuerpos de seguridad y sistemas de tránsito, así como los servicios financieros y productivos del país (bancos, industria, comercio, etc.).

La implementación de pararrayos puede llevarse a cabo en puntos específicos a lo largo de una línea de transmisión, para lograr mejoras en la actuación contra las descargas electroatmosféricas y mayores beneficios económicos.

INTRODUCCIÓN

La incidencia directa de las descargas electroatmosféricas en los conductores de fase se deben a la parcial protección de los cables de guarda, con lo cual se origina el voltaje de flameo (flashover) o la incidencia de las descargas electroatmosféricas en el cable de guarda. Así pueden originarse sobrevoltajes de flameo inverso (back flashover), debido a la deficiencia para drenar las descargas por la elevada resistencia al pie de la torre (que está en función de la “resistividad” del terreno y sistema de puesta a tierra). Estas son las principales causas de salidas forzadas en las líneas de alta tensión.

El Sistema Nacional Interconectado de Guatemala (SNI), en más de una oportunidad, ha colapsado total o parcialmente, debido a fallas en líneas de transmisión de 230 kV originadas por descargas electroatmosféricas contra las cuales no están protegidas con pararrayos, cuyos soportes tipo poste autosoportado, un cable de guarda y aislamiento polimérico son de similares características a las utilizadas en la línea 230 kV Brillantes – La Esperanza, con la diferencia de estar ubicadas en áreas geográficas diferentes.

La línea 230 kV Brillantes – La Esperanza es la más importante para el occidente del país, situación por la cual se requiere el estudio para su protección contra las descargas electroatmosféricas por medio de pararrayos, con lo que se garantice continuidad en el transporte de la potencia a esa región.

Tomando en consideración que la geografía de diseño de la línea Brillantes – La Esperanza es por zonas que presentan altos niveles cerámicos, queda expuesta a ser alcanzada por las corrientes de rayo.

Las salidas forzadas en la línea Brillantes – La Esperanza pueden dejar sin servicio eléctrico poblados de Quetzaltenango y Huhuetenango, situación que se pretende minimizar con la implementación de pararrayos de línea.

1. ANÁLISIS DE LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO DE DISEÑO DE LA LÍNEA 230 KV BRILLANTES - LA ESPERANZA

La línea de transmisión 230 kV Brillantes - La Esperanza entra en operación el 27 junio del año 2,003, con lo cual se convierte en la primera línea en ese nivel de voltaje que interconecta la región Sur con el Occidente del país, uniendo la subestación Los Brillantes, en el departamento de Retalhuleu, con la subestación La Esperanza, en la cabecera departamental de Quetzaltenango.

La línea tiene una longitud de 39.15 kilómetros, y su altura en metros sobre el nivel de mar (m.s.n.m.) va desde 380 m.s.n.m. en la subestación Brillantes, llegando a alcanzar una altura de hasta 2,550 m.s.n.m. El remate de la línea se encuentra a una altura de 2,420 m.s.n.m., en la subestación La Esperanza.

1.1. Importancia de la línea 230 kV Brillantes – La Esperanza

La red de transporte de energía eléctrica de la región suroccidental de Guatemala básicamente está compuesta por líneas de transmisión de 69 kV. Con la energización de la línea 230 kV Brillantes – La Esperanza, el sistema de transmisión de esa región del país se torna más estable y confiable, con lo cual se garantiza de una mejor forma la continuidad y calidad del fluido eléctrico, ya que se reducen las variaciones de voltaje y se descargan otras líneas que operan al límite de su capacidad de transporte.

A través de esta línea se tiene estimado transportar 209 MW como máximo, potencia que básicamente se genera en la Costa Sur por diversas plantas térmicas, potencia que se traslada desde el departamento de Escuintla hasta la subestación de Los Brillantes a través de la línea Escuintla 1 - Brillantes en 230 kV.

1.2. Descripción de la línea de transmisión

La línea está compuesta por un solo circuito; montada en postes tubulares de acero, cuyas alturas son de 27, 29, 30 y 32 metros; utiliza un conductor por fase (Buntig 3, tipo ACAR, 1,280 MCM, 18/19); un cable de guarda (acero galvanizado de 9.52 milímetros de diámetro tipo EHS, de 7 hilos).

Todo el aislamiento de la línea de transmisión es de tipo polímero, en los postes de suspensión el aislamiento tiene la forma de un brazo aislante (V-horizontal) y para los postes de amarre el aislamiento polimérico es de suspensión y tipo poste para los cuellos o puentes.

1.3. Verificación del aislamiento de diseño

Como ya se indicó, todo el aislamiento utilizado en la línea de transmisión 230 kV Brillantes - La Esperanza es polimérico. Las características eléctricas se detallan en las siguientes tablas.

Tabla I. Especificaciones eléctricas del aislador polimérico tipo poste de diseño

Especificación	Magnitud
Distancia de fuga	6,350 mm
Distancia de arqueo en seco	2,464 mm
Flameo en seco a 60 Hz	955 kV
Flameo en húmedo a 60 Hz	780 kV
Impulso crítico positivo	1,520 kV
Impulso crítico negativo	1,610 kV

Fuente: División de planeación e ingeniería de ETCEE-INDE.

Tabla II. Especificaciones eléctricas del aislador polimérico tipo suspensión de diseño

Especificación	Magnitud
Distancia de fuga	6,010 mm
Distancia de arqueo en seco	2,400 mm
Flameo en seco a 60 Hz	880 kV
Flameo en húmedo a 60 Hz	815 kV
Impulso crítico positivo	1,485 kV
Impulso crítico negativo	1,510 kV

Fuente: División de planeación e ingeniería de ETCEE-INDE.

1.3.1. Voltaje de flameo en seco

Las Normas Técnicas de Diseño y Operación de las Instalaciones de Distribución NTDOID, de la Comisión Nacional Energía Eléctrica CNEE de Guatemala, en el artículo 15.5, tabla “A”, indican que el nivel de tensión de flameo en seco de un aislador o una cadena de aisladores no debe ser inferior a 640 kV para voltajes de 230 kV entre fases, de acuerdo con la norma ANSI C29.1-1988, expresando también que en zonas en donde las descargas electroatmosféricas son severas o existen condiciones de contaminación atmosférica alta u otra condición de contaminación desfavorable, deben usarse aisladores con tensiones de flameo en seco adecuadas a esas condiciones y no menores a los indicados en dicha tabla “A”.

Por lo tanto, se puede concluir que los aisladores empleados en la línea 230 kV Brillantes – La Esperanza cumplen con el voltaje mínimo de flameo en seco, ya que el aislador tipo poste posee un voltaje de flameo en seco de 955 kV y el tipo suspensión, 880 kV, que son superiores a los 640 kV que indica la norma.

1.3.2. Distancia de fuga

En virtud de que la contaminación causada por agentes como polvos obtenidos de la combustión de carbón o petróleo, polvos de cemento, lluvia salina, irrigación con plagicidas, fertilizantes, y otros que al mezclarse con la niebla o lluvia ligera reducen en el aislamiento el nivel de voltaje de flameo a la frecuencia nominal, es importante la verificación de la distancia de fuga del aislamiento de la línea 230 kV Brillantes – La Esperanza, tomando en cuenta que la trayectoria predominante es por área rural, agrícola y montañosa, con excepción de algunas poblaciones, como por ejemplo la cabecera departamental de Quetzaltenango.

Tabla III. Nivel de contaminación y líneas de fuga para aislamientos exteriores

Nivel de contaminación	Áreas	Línea de fuga mínima “k” (de fase a tierra) en mm/kV con respecto al voltaje fase a fase máximo del sistema
Ligera	Sin industria, rural o baja densidad de vivienda, frecuentes vientos y lluvia, agrícolas, montañosas	16.0
Media	Industriales no productoras de humos contaminantes, expuestas a vientos marinos alejadas del mar	20.0
Alta	Alta densidad de industria, próximas al mar expuestas a fuertes vientos marinos.	25.0
Muy alta	Extensas con mucho polvo, industrias productoras de humo y partículas pesadas en suspensión	31.0

Fuente: Comité Internacional de Electrotecnia IEC, documento 815.

La expresión para la distancia de fuga mínima está dada por: $d = k * V_{max}$, para la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza. La distancia de fuga de los aisladores poliméricos empleados es: 6,350 mm para el tipo poste y 6,010 mm para el tipo suspensión. Despejando la línea de fuga “k”, se determina la capacidad de operación de dichos aisladores, en lo que respecta a los diferentes niveles de contaminación ($k = d / V_{max}$).

Según las Normas Técnicas de Diseño y Operación del Servicio de Transporte de Energía Eléctrica NTDOST de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica CNEE de Guatemala, artículo 11.4, tabla No. 1, para un sistema nominal de 230 kV el voltaje máximo es de $V_{max} = 242$ kV, de acuerdo a las normas ANSI C84 y C92.

Con los valores conocidos se tiene que para el aislador tipo poste la línea de fuga es: $k = 26.24$ mm/Kv y para el aislador tipo suspensión la línea de fuga es: $k = 24.83$ mm/kV, con lo cual el aislamiento empleado tiene distancias de fuga adecuadas para la operación de la línea, tomando en cuenta lo indicado en la tabla III y considerando que el trayecto de la línea es por área rural, agrícola y montañosa; los niveles de línea de fuga “k” calculados están en el rango que corresponde a una contaminación alta ($k = 25$ mm/kV), valor que se estima no se alcanza.

1.3.3. Nivel básico de aislamiento BIL

El voltaje que produce la descarga disruptiva (voltaje crítico de flameo VCF) varía con la densidad del aire y la humedad (y ambos varían con la altura sobre el nivel del mar) con lo cual se reduce el paso medio (o la distancia) libre de las cargas y también se reduce la movilidad de estas, debido a que son capturadas por moléculas de agua, efectos por los cuales es necesario aplicar algunos factores de corrección.

Para alturas de hasta 1,000 m.s.n.m, la expresión que relaciona el nivel básico de aislamiento (BIL) con el voltaje crítico de flameo (VCF) es: $BIL = VCF * (1 - 1.3\sigma)$, en donde σ es la desviación estándar referida al valor del VCF obtenida de la distribución de Gauss; para el caso de impulso de rayo, se recomienda usar $\sigma = 3\%$, con lo cual, sustituyendo el valor anterior, se tiene que: $BIL = 0.961 * VCF$ (kV).

La distancia de fase a tierra está dada por medio de la expresión: $D = VCF / K$ (m), en donde VCF es el voltaje crítico de flameo y K es el factor de electrodo o gradiente de voltaje al impulso; para la configuración de conductor a estructura, el valor de K es de 550 kV/m; por lo tanto: $VCF = 550 * D$ (kV).

La distancia D resultante en la configuración del aislamiento en “V” de diseño de la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza es: $D = 2.710$ m, por lo que el voltaje crítico de flameo es: $VCF = 1,490$ kV y el nivel básico de aislamiento es: $BIL = 1,432$ kV.

Para un nivel de voltaje nominal de 230 kV, el valor máximo normalizado hasta 1,000 m.s.n.m. del nivel básico de aislamiento es: $BIL_{(MAX)} = 1,050$ kV; para alturas superiores se aplican los factores de corrección por altitud “ δ ” que aparecen en la tabla IV.

Tabla IV. Factor de corrección que se aplica al BIL por efecto de la altitud

Altitud en m.s.n.m.	Factor “ δ ”	Altitud en m.s.n.m.	Factor “ δ ”
1,000	1.00	2,700	0.83
1,200	0.98	3,000	0.80
1,500	0.95	3,600	0.75
1,800	0.92	4,200	0.70
2,100	0.89	4,800	0.65
2,400	0.86	5,400	0.61

Fuente: Normas IEC y ANSI.

La máxima altura que alcanza la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza es de: 2,550 m.s.n.m., altura para la cual el factor de corrección del BIL, después de interpolar los valores de la tabla IV, es: $\delta = 0.845$.

Aplicando el factor de corrección $\delta = 0.845$, al BIL de 1,050 kV (a 1,000 m.s.n.m.) para encontrar el BIL equivalente a una altura de 2,550 m.s.n.m. (que es la altura máxima que alcanza la línea de transmisión 230 kV Brillantes - La Esperanza), se tiene que: $BIL_{(2,550 \text{ m.s.n.m.})} = 1,243 \text{ kV}$.

Con los resultados obtenidos, se verifica que el BIL de 1,432 kV del asilamiento polimérico empleado en la línea 230 kV Brillantes – La Esperanza está dimensionado para operar a una altitud de 2,550 m.s.n.m., ya que para esta altura se necesita un BIL de 1,243 kV (tomando como referencia el BIL máximo normalizado de 1,050 kV para un voltaje nominal de 230 kV).

1.4. Verificación del blindaje de diseño

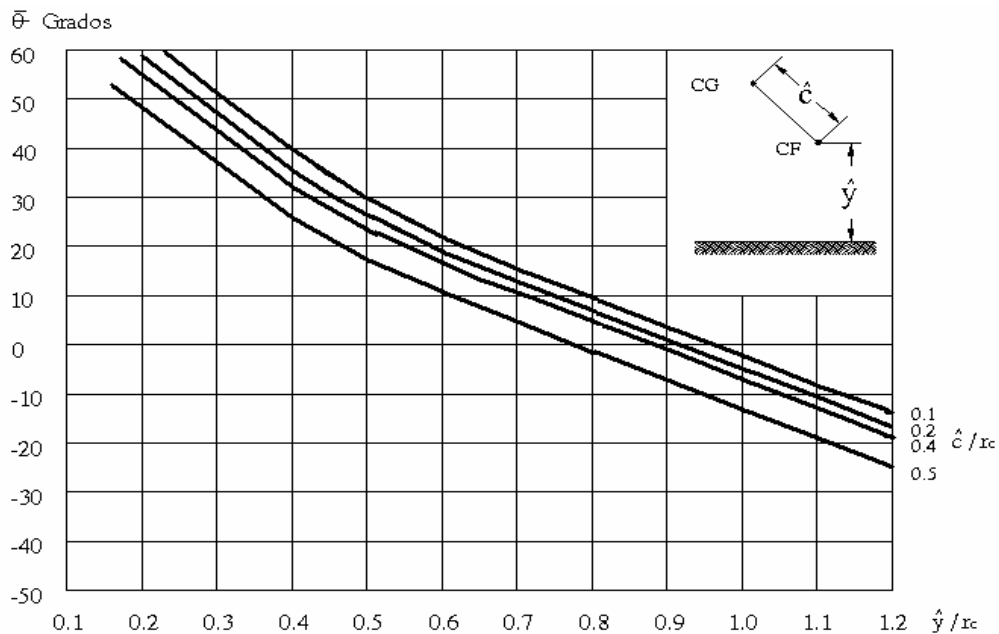
La probabilidad de que un rayo incida sobre un conductor de fase depende de la posición que tengan los cables de guarda con respecto a los conductores de fase, cuya posición queda definida, de ordinario, por lo que se conoce como el ángulo de blindaje θ_0 .

Cuando en la estructura (torre o poste) están determinadas las características de los conductores de fase y su posición geométrica, lo que sigue es la determinación del número y posición de los cables de guarda, de tal manera que el riesgo de falla de la línea por descargas electroatmosféricas tienda a cero.

Para la verificación del ángulo de blindaje de la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza, se desarrolla el siguiente procedimiento:

- a. Se calculan los valores de \hat{y} , \hat{c} y r_c .
- b. Se obtienen las relaciones \hat{y}/r_c y \hat{c}/r_c .
- c. En la figura 1, gráfica $\theta_o - \hat{y}/r_c$, se entra en el eje de las abscisas con la relación \hat{y}/r_c y se corta la curva correspondiente a la relación \hat{c}/r_c .
- d. En la figura 1 (gráfica $\theta_o - \hat{y}/r_c$), en el eje de las ordenadas se encuentra el correspondiente ángulo de blindaje total θ_o .

Figura 1. Gráfica para la verificación del ángulo de blindaje



Fuente: Comisión Federal de Electricidad de México CFE.

Los valores de \hat{y} , \hat{c} y r_c se calculan a partir de las siguientes expresiones:

$$r_c = 9.4 * (1.1 * I)^{2/3} \quad (\text{distancia del canal guía del rayo hacia la fase más alta})$$

$$\hat{y} = y_t \quad (\text{altura media del conductor de fase más alto, para terreno quebrado})$$

$$\hat{c} = 6 \times 10^{-3} * V_{50\%} \quad (\text{distancia del conductor de fase al cable de guarda})$$

$$I = 2 * V_{CO\%} / Z_C \quad (\text{corriente crítica del rayo que produce flameo})$$

$$V_{CO\%} = 0.9 * VCF \quad (\text{voltaje de flameo que produce falla})$$

$$Z_C = 60 * \ln(2 \hat{y} / r_e) \quad (\text{impedancia característica de los conductores de fase})$$

$$r_e = \text{radio medio geométrico} \quad (\text{igual a } 0.06 \text{ m para un conductor por fase})$$

$$y_t = \text{altura desde el suelo hasta el conductor más alto en el poste}$$

$$VCF = \text{voltaje crítico de flameo del aislamiento}$$

Para la línea 230 kV Brillantes – La Esperanza, los valores que se tienen son:

$$VCF = 1,490 \text{ kV}; y_t = 22.9 \text{ m}; r_e = 0.06 \text{ m}.$$

Los resultados que se obtienen son los siguientes: $\hat{y} = 22.9$; $Z_C = 398 \Omega$;

$$V_{CO\%} = 1,341 \text{ kV}; I = 6.73 \text{ kA}; r_c = 35.7 \text{ m}; \hat{c} = 8.94 \text{ m}; \hat{y}/r_c = 0.64; \hat{c}/r_c = 0.25.$$

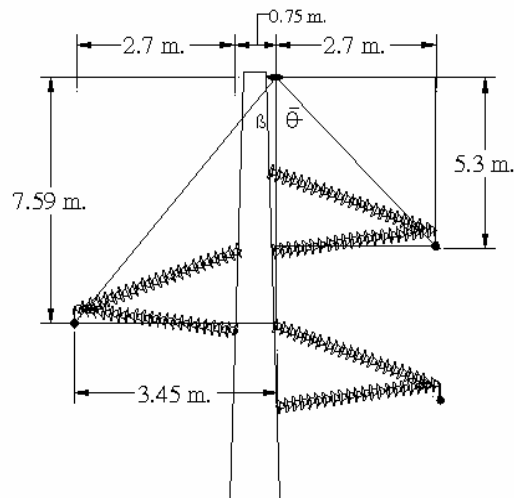
Interpolando la curva $\hat{c}/r_c = 0.25$ en la figura No. 1 (gráfica $\theta_o - \hat{y}/r_c$) con $\hat{y}/r_c = 0.64$, el ángulo de blindaje total resulta que es aproximadamente igual a: $\theta_o = 14^\circ$.

De la gráfica mostrada en la figura No. 1, se obtiene la siguiente expresión para el ángulo de blindaje total: $\theta_o = \text{sen}^{-1}((r_c - \hat{y}) / r_c) - \text{sen}^{-1}(\hat{c} / (2 * r_c))$.

Aplicando los valores ya conocidos para la línea 230 kV Brillantes – La Esperanza, el ángulo de blindaje total es igual a: $\theta_o = 13.82^\circ$, valor con el cual se verifica el ángulo proyectado en la gráfica ($\theta_o = 14^\circ$).

El ángulo de blindaje total calculado anteriormente, es un ángulo ideal. El ángulo de blindaje de diseño θ , dada la configuración real de la línea Brillantes – La Esperanza de acuerdo a la figura 2, es: $\theta = \text{tg}^{-1} (2.7 / 5.3)$, resultando que $\theta = 27^\circ$, para la fase intermedia. Así pues, se tiene que el ángulo $\beta = \text{tg}^{-1} (3.45 / 7.59)$, por lo que $\beta = 24.4^\circ$

**Figura 2. Configuración básica de un poste de suspensión, línea 230 kV
Brillantes - La Esperanza**



Fuente: Elaboración del autor.

De acuerdo con la geometría mostrada en la figura 2, el ángulo de blindaje de diseño de la línea Brillantes – La Esperanza es: $\theta = 27^\circ$, valor que al ser comparado con el ángulo de blindaje total ($\theta_0 = 14^\circ$) indica que el blindaje de la línea de transmisión Brillantes - La Esperanza no es completo; por lo tanto, existe la probabilidad de que se originen salidas forzadas por descargas electroatmosféricas que incidan directamente en las fases, situación por la cual es necesario el estudio para la implementación de pararrayos de línea.

El ángulo de blindaje es indicativo de la probabilidad de que un rayo incida sobre los conductores de fase. En general los ángulos de blindaje se relacionan con las estructuras (a mayor altura, mayor probabilidad de descarga) de manera que se establecen las siguientes relaciones:

- Para líneas de transmisión con un cable de guarda y una altura desde el nivel del suelo hasta aquel, de: $h_g \leq 25.0$ m; $15^\circ \leq \theta_o \leq 30^\circ$, la probabilidad de violar la zona de protección es de: $p = 40\%$.
- Para líneas de transmisión con dos cables de guarda y una altura desde el nivel del suelo hasta aquellos, de: $h_g \leq 30.0$ m; $0^\circ \leq \theta_o \leq 15^\circ$, la probabilidad de violar la zona de protección es de: $p = 12\%$.

En el caso de que una descarga electroatmosférica viole la zona de protección que el cable de guarda le brinda a la línea e incida en un conductor de fase, aparecerá una onda de voltaje $V_C = (I/2) * Z_C$, donde $I/2$ es la corriente de rayo en kA (se da por sabido que la corriente de rayo se divide en dos partes iguales a partir del punto de la fase en donde cae); Z_C es la impedancia característica del conductor de fase donde cae la descarga.

Para la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza, en la tabla V aparecen para valores típicos de corriente de rayo (que violan la zona de blindaje y asumiendo que inciden en la fase más alta con $Z_C = 398 \Omega$) los voltajes que aparecen en el conductor como resultado de la descarga.

Tabla V. Corrientes típicas de rayo y voltajes asociados que aparecen en el conductor de descarga de la línea Brillantes - La Esperanza, para $Z_c = 398 \Omega$

I (kA)	V_c (kV)
5	995
6	1,194
7	1,393
8	1,592
9	1,791
10	1,990
20	3,980

Fuente: Elaboración del autor.

En virtud de que para la línea Brillantes - La Esperanza el voltaje crítico de flameo es: $V_{CF} = 1,490$ kV y que el voltaje de flameo que produce falla es $V_{CO\%} = 0.9 * V_{CF}$, se tiene que $V_{CO\%} = 1,341$ kV, valor con el cual la corriente mínima de rayo que produce falla en el aislamiento es de 6.73 kA para una Z_c de 398Ω (como aparece en la sección 1.4).

1.5. Verificación de la red de puesta a tierra

Las líneas de transmisión que son alcanzadas por las descargas electroatmosféricas y cuya incidencia ocurre en los cables de guarda, se comportan de tal forma que, dependiendo de su sistema de tierra, determinan lo que se conoce como voltaje de flameo inverso (back flashover).

En principio la corriente de rayo que incide en los cables de guarda o en las estructuras (torres o postes) es conducida a tierra a través de las mismas y por las bajadas a tierra, esperándose que el terreno y los elementos de conexión de puesta a tierra de la estructura, en forma combinada, den un valor conocido como “resistencia al pie de la torre”. Dicho valor debe ser el más bajo, para evitar el fenómeno de reflexión de ondas de forma constante.

Para el cálculo de los sobrevoltajes de flameo inverso, la resistencia al pie de la torre resulta un parámetro muy importante, y el valor de esta se obtiene de la combinación de la resistividad del terreno y la resistencia de los elementos de puesta a tierra (electrodos o contrantenas).

1.5.1. Voltajes que aparecen durante una descarga

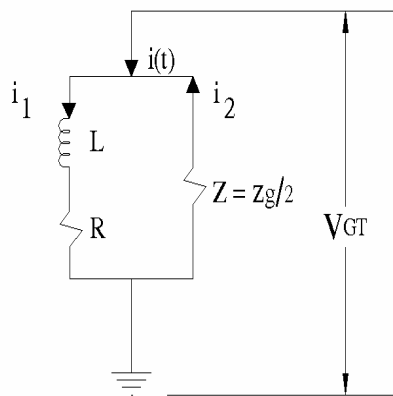
Para determinar el efecto de la resistencia al pie de la torre, el cual, como ya se indicó, puede manifestarse en el valor del voltaje de flameo inverso, se considera que las líneas de transmisión en alta tensión tienen cables de guarda y que la red de puesta a tierras permite obtener un adecuado valor de resistencia al pie de la torre.

Son dos los voltajes transitorios que aparecen durante una descarga electroatmosférica: voltaje en la parte superior, o punta de la estructura, y voltaje de flameo inverso, en los aisladores de la línea.

1.5.1.1. Voltaje en la parte superior o punta de la estructura

Se considera que la corriente de rayo en el punto de impacto en el hilo de guarda se divide en dos partes iguales y se conduce a través de la estructura, como se representa en la figura 3.

Figura 3. Distribución de la corriente de rayo en el hilo de guarda y la estructura



Fuente: Coordinación de aislamiento, Comisión Federal de Electricidad CFE.

Aquí, $i(t)$ es la corriente de rayo (kA); $L(t)$ es la inductancia equivalente de la estructura en μH ; R es la resistencia al pie de la torre en Ω ; Z es la impedancia equivalente del cable de guarda en Ω ($Z = z_g/2$).

La z_g es igual a: $60 * \ln(2 \hat{h} / r_g)$, donde z_g es la impedancia característica del cable de guarda en Ω ; \hat{h} es la altura promedio y es igual a h_g para terreno ondulado o quebrado; h_g es la altura desde el nivel del suelo hasta el cable de guarda en la estructura, y r_g es el radio del cable de guarda.

La corriente de rayo se conduce a tierra a través de la torre y los cables de guarda (conectados a la torre). La impedancia equivalente del cable de guarda queda en paralelo con la resistencia al pie de la torre: $(R * Z) / (R + Z)$, que produce un voltaje con la corriente de rayo $i(t)$ que es: $((R * Z) / (R + Z)) * i(t)$.

La corriente de rayo también se refleja al llegar al pie de la torre con un coeficiente de reflexión: $\Gamma = (Z - R) / (Z + R)$, coeficiente que da una onda reflejada y produce un voltaje con la inductancia de la estructura cuyo valor es: $((Z - R) / (Z + R)) * L * (di/dt)$; donde $L(t)$ es la inductancia equivalente de la estructura en μH , y di/dt es el índice de crecimiento de la corriente. Los valores típicos para L son $20 \mu H$ para estructuras de hasta $40 m$ de altura y di/dt $40 kA / \mu s$.

Por lo tanto, el voltaje en la punta de la estructura V_{GT} es igual a la expresión definida como: $V_{GT} = ((R * Z) / (R + Z)) * i(t) + ((Z - R) / (Z + R)) * L * (di/dt)$.

1.5.1.2. Voltaje de flameo inverso en los aisladores de la línea

Para tomar en consideración el voltaje por flameo inverso, se debe incorporar el efecto del voltaje de acoplamiento del cable de guarda a los conductores de fase a través del factor de acoplamiento o capacitancia “C”. Se toma en cuenta también que, en el momento en que se presenta una descarga, la línea está energizada, por lo que existe un voltaje pico senoidal de fase a neutro en cada fase $V_{FN(pico)}$, que se superpone a la onda de rayo. Por lo tanto, el voltaje que aparece en los aisladores por efecto inverso queda definido por: $V_{FI} = V_{GT} - C * ((R * Z) / (R + Z)) * i(t) - C * ((Z - R) / (Z + R)) * L * di/dt \pm V_{FN(pico)}$.

1.5.2. Corriente de rayo que produce flameo inverso

Para el cálculo de la corriente de rayo que produce flameo inverso, se supone que el voltaje en los aisladores (V_{aisl}) es el voltaje de aguante o nivel básico de aislamiento

$$\text{BIL: } i(t) = V_{\text{aisl}} * ((R+Z)/((R*Z)(1-C))) - ((Z-R)/(R*Z))*(L)*(di/dt) \pm ((R + Z)/((R*Z)(1 - C)))V_{\text{FN(pico)}}.$$

Para la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza la magnitud de los parámetros son: factor de acoplamiento $C = 0.16 \mu\text{F}$, impedancia característica del cable de guarda $z_g = 563 \Omega$ y $Z = 281.5 \Omega$; tomando $L = 20 \mu\text{H}$ y di/dt es $40 \text{ kA}/\mu\text{s}$, para valores de resistencia al pie de la torre (R) medidos en diferentes estructuras. Las corrientes de rayo que producen flameo inverso para dichas resistencias se presentan en la tabla VI.

Tabla VI. Magnitudes de corriente de rayo que producen flameo inverso para diferentes resistencias al pie de la estructura

Resistencia al pie de la estructura "R" en Ω	Corriente de rayo $i(t)$ que produce flameo inverso en kA
40	38
30	48
25	55
20	67
15	86
10	124
7	173
5	238

Fuente: Elaboración del autor.

Con los resultados indicados en la tabla VI, se verifica la importancia que ocupa la resistencia al pie de la estructura en las salidas de líneas forzadas por flameo inverso, y la necesidad de que esta tenga valores pequeños para que, así, la corriente de rayo que produce flameo inverso sea de magnitud relativamente alta y poco probable.

1.6. Métodos para mejorar la actuación de una línea de transmisión

En líneas de transmisión con voltaje nominal de hasta 230 kV, las descargas electroatmosféricas contribuyen en las aperturas no programadas, en rangos que van desde el 30% hasta el 70% del total de salidas no deseadas, dependiendo de las características del suelo y de las actividades electroatmosféricas de las regiones por donde atraviesa la línea. Existen diferentes métodos para minimizar las salidas de líneas de transmisión no programadas debidas a descargas electroatmosféricas, los cuales pueden ser aplicados individualmente o combinados.

1.6.1. Distancia de aislamiento

Para la línea de transmisión 230 kV Brillantes - La Esperanza, este método resulta prácticamente imposible de aplicar, ya que por el aislamiento polimérico utilizado (rígido), el aumentar la distancia de aislamiento equivale a reemplazar todo el aislamiento por uno nuevo, lo cual implica costos muy elevados.

El aumento de aislamiento en una línea de transmisión está directamente relacionado con la necesidad de aumentar el nivel de soportabilidad de los equipos que se encuentran interconectados a ella (en especial los transformadores, interruptores y seccionadores) o de instalar pararrayos próximos a estos.

Lo expuesto lleva a plantear que es preferible que falle una línea por flameo en el aislamiento y que el mismo, dependiendo de la magnitud del sobrevoltaje, se perfora, a que la falla no se conduzca a tierra y se introduzca al equipo más costoso (transformador) y lo destruya de forma irreversible.

1.6.2. Blindaje

Para líneas de transmisión sin cables de guarda, la incorporación de estos, más la mejoría en el sistema de aterramiento, incide en la reducción del índice de salidas no programadas.

La adición de cables de guarda es una solución que puede ser inviable desde el punto de vista económico, principalmente si se considera el caso del proyecto en que las estructuras no están diseñadas para soportar los esfuerzos mecánicos adicionales producidos por la adición de los cables de guarda, lo cual requiere el refuerzo de las estructuras. Por otra parte, no siempre es factible técnicamente, o viable económicamente, la obtención de niveles aceptables de impedancia de aterramiento.

En el caso de la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza, mejorar el ángulo de blindaje equivale a incorporar un elemento para elevar la altura del cable de guarda, con lo cual, al aumentar la altura sobre el nivel del suelo, el área de exposición también crece y se torna vulnerable a la penetración de las descargas electroatmosféricas.

1.6.3. Sistema de tierras

La reducción de los valores de resistencia al pie de la estructura conduce a una reducción significativa en los índices de salidas no deseadas en las líneas de transmisión con cables de guarda, principalmente por los efectos del voltaje de flameo inverso.

Entre los métodos más usados para mejorar el sistema de tierras está la utilización de electrodos de tierra y contrantenas.

1.6.3.1. Electrodo de tierra

Este método se utiliza en líneas de transmisión con voltaje nominal de hasta 69 kV, y se emplean electrodos rígidos de sección circular, los cuales se clavan verticalmente en el suelo.

Se puede utilizar un solo electrodo, pero dependiendo de las necesidades que se tengan como producto de las altas resistividades de los terrenos, pueden emplearse más de uno, dispuestos en forma alineada, triangular o circular.

1.6.3.2. Contrantenas

Este método se utiliza en líneas de transmisión con voltajes nominales iguales o mayores a 138 kV, el cual consiste en aterrizar las torres o estructuras, respectivamente, por medio de conductores que pueden ser: acero (en terrenos no corrosivos, como lo son los terrenos de cultivo o secos), cobre o aluminio (solo en terrenos corrosivos), que se entierran de forma horizontal.

Este tipo de redes busca mayor área de contacto con el terreno y por eso se diseñan como trayectorias horizontales, no se entierran a gran profundidad (entre 0.50 y 0.60 m bajo el nivel del suelo) y es deseable que el calibre del conductor o su diámetro sea igual al del cable de guarda.

Aplicar el método de contrantenas para mejorar del sistema de tierras de la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza resulta económicamente oneroso, debido a que técnicamente, por la forma de la red y por el terreno predominantemente quebrado, se requiere de trabajos con alto costo de ejecución.

1.6.4. Implementación de pararrayos

Entre los métodos actualmente empleados para la reducción (con tendencia a cero) de los índices de salidas de línea no programadas debidos a la acción de las descargas electroatmosféricas, está la implementación de pararrayos de línea.

La aplicación de pararrayos se presenta como el método más eficaz , desde los puntos de vista técnico y económico, y su uso se considera actualmente como el método que logra mejores resultados y, generalmente, presenta la mejor relación entre costo y beneficio.

Los siguientes capítulos presentan el estudio para la aplicación y selección de los pararrayos de línea que de manera más eficiente, con menor costo y mayor beneficio, protegerán la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza contra las descargas electroatmosféricas.

2. ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE INTERVIENEN EN LAS SALIDAS FORZADAS DE LA LÍNEA 230 KV BRILLANTES - LA ESPERANZA

Las salidas no programadas de líneas de transmisión en los sistemas eléctricos de potencia, provocadas por cualquier causa, implican daños a los equipos que se interconectan por las mismas, y pérdidas económicas cuantiosas a muchos sectores de la sociedad.

Las fallas en las líneas de transmisión se originan por diversas circunstancias, siendo las más comunes, las fallas en el aislamiento, los disturbios eléctricos, las deficiencias mecánicas y térmicas de cualquier elemento que conforman una línea de transmisión.

En líneas de alto voltaje, las descargas electroatmosféricas son la causa principal que hacen fallar a las mismas. También una brecha defectuosa (árboles o plantas próximos o en contacto con las fases) origina disturbios temporales o permanentes en las líneas de transmisión.

2.1. Registro de aperturas en la línea Brillantes - La Esperanza

De acuerdo con información del Centro Nacional de Operaciones CENADO, de ETCEE- INDE, el registro de salidas forzadas y programadas de la línea de transmisión 230 kV Brillantes - La Esperanza, desde su energización el 27 de junio del 2,003, aparece indicado en la tabla VII.

Tabla VII. Registro de aperturas en la línea Brillantes - La Esperanza

No. de salidas	Tipo	Causa
06	Programada	Mantenimiento de línea
01	No programada	Brecha defectuosa
03	No programada	Descarga electroatmosférica.

Fuente: Centro Nacional de Operaciones, ETCEE-INDE.

Al analizar los registros de aperturas en la tabla VII de la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza, se tiene que han ocurrido cuatro salidas forzadas, una por brecha defectuosa y tres por descarga electroatmosférica.

Se puede deducir que la falla por brecha defectuosa se debe al hecho de que por ser una línea recién construida, la vegetación no se ha removido completamente, pero con el transcurrir del tiempo se espera que mejore, y probablemente las aperturas por este tipo de problema sigan en un segundo plano, por detrás de las provocadas por descargas electroatmosféricas.

También se puede indicar que, pese a que la operación de la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza ha sido en parte del invierno recién pasado y que durante mucho tiempo la misma ha permanecido desenergizada por trabajos programados, ya se reportan tres salidas forzadas por descargas electroatmosféricas, lo cual es indicio de que existe la probabilidad de que con la llegada de la nueva época de invierno, la línea sufra salidas forzadas en cantidad mayor a la que actualmente tiene registrada, como consecuencia de la actividad electroatmosférica.

Lo expuesto anteriormente justifica la realización del estudio para la implementación de pararrayos en la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza, con lo cual se reduzca, con tendencia a cero, el índice de salidas forzadas originadas por descargas electroatmosféricas, para que de esa forma el Sistema Nacional Interconectado adquiera mayor estabilidad y disponibilidad.

2.2. Niveles cerámicos

La determinación de los efectos que provocan las descargas electroatmosféricas en los sistemas eléctricos de potencia , empieza con el estudio de aspectos muy importantes, como lo son:

- a. densidad de rayos a tierra

- b. características de las corrientes del rayo

En los sistemas eléctricos de potencia, partiendo desde el punto de vista de diseño, es indispensable conocer cuántos rayos inciden o caen en una determinada área geográfica, con lo cual se determina la actividad electroatmosférica por regiones y se aplican diferencias en los criterios para el diseño.

En el procedimiento para medir la intensidad de las descargas electroatmosféricas es importante definir los conceptos de nivel cerámico y densidad de rayos a tierra.

2.2.1. Concepto de nivel cerámico

El nivel cerámico se expresa por un valor que indica el número promedio de días con tormenta anual en una región particular. Los puntos o lugares de una zona geográfica de determinada región de un país que tienen el mismo nivel cerámico se unen y forman lo que se llama mapa isocerámico, el cual se usa para el diseño de los sistemas eléctricos de potencia.

2.2.2. Concepto de densidad de rayos a tierra

La densidad de rayos a tierra es una forma de medir el número de descargas electroatmosféricas a tierra, que son las de interés para el análisis de los sistemas eléctricos de potencia.

El método consiste en medir (por medio de un contador de rayos que tiene un área de medición con un radio de 20 km a la redonda con respecto a su punto de instalación) la variación de la intensidad del campo eléctrico en la atmósfera en el momento de la descarga.

La relación entre el nivel cerámico y la densidad de rayos a tierra puede expresarse por la fórmula empírica de la IEEE: $N_g = 0.04 N_c^{1.25}$, de cuya expresión se tiene que N_g es la densidad de rayos a tierra (número de rayos a tierra por km^2) y N_c es el nivel cerámico (días con tormentas al año).

El trayecto de la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza es en parte por región de bocacosta; los niveles cerámicos de los lugares por donde atraviesa, de acuerdo a la actualización más reciente del mapa cerámico de la República de Guatemala, son: 100, 80, 60 y 50 días con tormenta al año, niveles para los cuales, aplicando la fórmula de IEEE, se obtienen diferentes densidades de rayos a tierra, que son mostrados en la tabla VIII.

Tabla VIII. Niveles cerámicos para la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza y sus correspondiente densidades de rayos a tierra

Nc (días con tormentas al año)	N _g (número de rayos a tierra, según IEEE)
50	5.32
60	6.68
80	9.57
100	12.65

Fuente: Elaboración del autor.

Analizando los resultados que se muestran en la tabla VIII, es importante señalar que los valores de nivel cerámico disminuyen gradualmente de la subestación Los Brillantes en Retalhuleu, a la subestación La Esperanza en Quetzaltenango; de igual forma sucede con el número de rayos a tierra, por lo cual se puede afirmar que para la línea Brillantes - La Esperanza es más probable que las descargas electroatmosféricas originen salidas de línea en las regiones donde las altitudes en m.s.n.m. son menores debido a un mayor nivel cerámico.

2.3. Corriente de rayo

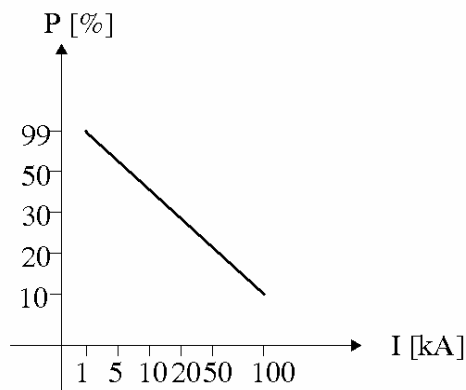
Las características de la corriente de rayo se dividen en dos aspectos fundamentales: la distribución probabilística de las corrientes del rayo y la forma de onda y su efecto sobre los sistemas eléctricos de potencia

2.3.1. La distribución probabilística de las corrientes de rayo

Se obtiene midiendo la intensidad de corriente del rayo, de manera que se pueda expresar gráficamente como una relación entre la probabilidad de ocurrencia contra la magnitud de la corriente del rayo.

La distribución probabilística recomendada por IEEE corresponde a una expresión del tipo: $P(i)I = 1 / (1 + (I/31)^{2.6})$, en la cual $P(i)$ indica la probabilidad de que ocurra una descarga electroatmosférica con una corriente de amplitud igual a I (en kA), expresión misma que puede ser graficada como se indica en la figura 4.

Figura 4. Gráfica de la probabilidad $P(i)$ de ocurrencia de una corriente de rayo I en kA



Fuente: IEEE.

2.3.2. Forma de onda de la corriente de rayo y sus efectos

El efecto de las corrientes del rayo sobre las instalaciones eléctricas, en los casos que una corriente eléctrica presenta una onda unidireccional y se desplaza en escalas de tiempo del orden de microsegundos (μs), se manifiesta en forma directa en las líneas de transmisión, ya que las mismas ocupan mayor territorio geográfico y atraviesan por diferentes zonas que tienen condiciones meteorológicas variadas.

La respuesta a la corriente de rayo varía en las líneas de transmisión dependiendo de si es una descarga directa o indirecta, aunque en ambos casos se presenta un sobrevoltaje que es proporcional a la magnitud de la corriente del rayo y la cual manifiesta sus efectos por la inducción en los conductores de fase y las respuestas del aislamiento (aire) entre los mismos y los elementos aterrizados de la línea (estructura).

Para determinar el efecto de las corrientes de rayo sobre las líneas de transmisión, se evalúa el número de descargas sobre la propia línea en función del número de rayos o nivel cerámico de las líneas, de acuerdo a la expresión: $NRL = 0.04 * N_c^{1.25} (0.0133(h_T + 2 * h_g))$, en la cual NRL es el número de rayos a la línea / 100 km – año, h_T es la altura equivalente de los conductores de fase para terreno ondulado y montañoso (igual a h_c), h_c es la altura del conductor más bajo con relación al nivel del suelo y h_g es la altura desde el nivel del suelo hasta el conductor de guarda (para el caso de la línea 230 kV Brillantes – La Esperanza $h_c = 18.51$ m y $h_g = 28.2$ m).

Para efectos de análisis, es importante tomar en cuenta que los niveles cerámicos cambian en el trayecto de la línea Brillantes - La Esperanza, teniendo asociado cada nivel cerámico una longitud proporcional estimada del total de la línea (39.15 km). En la tabla IX se muestran los resultados.

Tabla IX. Porcentajes de longitud estimada asociados a cada nivel cerámico de la línea Brillantes - La Esperanza

Nc	N _g	NRL	Porcentaje de línea estimado	Longitud correspondiente (km)
50	5.32	5.3	60%	0.60*39.15= 23.49
60	6.68	6.65	20%	0.20*39.15= 7.83
80	9.57	9.53	15%	0.15*39.15= 5.87
100	12.65	12.6	5%	0.05*39.15= 1.96

Fuente: Elaboración del autor.

Tabla X. Cantidad de rayos al año para cada nivel cerámico de la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza

Nc	NRL	Longitud correspondiente (km)	Rayos al año en el Nc
50	5.3	23.49	1.24
60	6.65	7.83	0.52
80	9.53	5.87	0.56
100	12.6	1.96	0.25
Total de rayos al año en la línea completa			2.57 ≈ 3

Fuente: Elaboración del autor.

Para encontrar la cantidad de rayos al año que corresponden a cada nivel cerámico, se obtiene el producto del NRL (número de rayos a la línea / 100 km – año) multiplicado por su longitud correspondiente en km, cuyos resultados se muestran en la tabla X. Se espera que aproximadamente 3 rayos al año incidan en la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza, desde el punto de vista probabilístico y de acuerdo a los niveles cerámicos de las regiones que encuentra en su trayecto.

Calculando un promedio de los diferentes niveles cerámicos por donde atraviesa la línea Brillantes - La Esperanza y evaluando dicho nivel cerámico para encontrar las descargas a la línea en su longitud completa (39.15 km), tenemos que:

$$N_c \text{ promedio} = (50 + 60 + 80 + 100) / 4 = 72.5$$

$$\text{NRL promedio} = 8.43 \text{ rayos a la línea} / 100 \text{ km-año}$$

$$\text{Rayos a la línea} / \text{año} = 8.43 * 39.15 / 100 = 3.3 \approx 4 \text{ rayos a la línea} / \text{año}$$

2.4. Efectos en el aislamiento debido a la altitud de operación de la línea

El principal efecto que la altitud ejerce sobre una línea de transmisión es la reducción de la distancia de aislamiento en el aire debido a la variación de la temperatura y la presión atmosférica, por lo cual es necesario corregir el Nivel Básico de Aislamiento BIL, para que el aislamiento no sufra flameos a tierra. Es importante observar el fenómeno que se da en el trayecto de la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza, ya que conforme atraviesa la región de la bocacosta y alcanza mayor altura, su nivel cerámico va decreciendo de acuerdo al mapa cerámico de la República de Guatemala.

Lo anteriormente expuesto indica que, a mayor altitud de la línea, el BIL del aislamiento tiene que aumentarse (debido a la corrección por altitud que se aplica), pero la probabilidad de incidencia de rayos al año decrece (debido a la disminución del nivel cerámico).

De acuerdo a los cálculos realizados en el capítulo I, se espera que las fallas por flameo a tierra en la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza tiendan a cero, en virtud de que el BIL del aislamiento polimérico utilizado está dimensionado para operar a las altitudes sobre el nivel del mar de las regiones por donde esta hace su recorrido.

2.5. Influencia de los agentes contaminantes en el aislamiento de la línea

El análisis desarrollado en el capítulo I, en donde se verifica la distancia de fuga del aislamiento polimérico utilizado en la línea Brillantes - La Esperanza, estima que los agentes contaminantes que existen en las áreas por donde corta la misma no afecten la operación continua de la misma, ya que las distancias de fuga se encuentran por encima de las requeridas.

En algunas zonas de tipo agrícola existen aplicaciones de funguicidas a cultivos, los cuales, por su composición química, al mezclarse con la neblina y lluvia pueden llegar a superar la distancia de fuga del aislamiento polimérico de diseño de la línea Brillantes - La Esperanza. Por ello, es importante tomar en cuenta que existe la posibilidad de que pueda originarse flameo a tierra, lo que hace necesario implementar un programa de mantenimiento predictivo y preventivo al aislamiento, para que, de esa forma, se puedan evitar salidas forzadas. El programa puede consistir en una simple inspección visual, pero también, en una termografía infrarroja.

3. ESPECIFICACIÓN TÉCNICA Y SELECCIÓN DE LOS PARARRAYOS PARA LA LÍNEA 230 KV BRILLANTES - LA ESPERANZA

La aplicación de pararrayos en las líneas de transmisión para reducir (con tendencia a cero) los índices de salidas no programadas, debido a la acción de las descargas electroatmosféricas, constituye el método más eficiente, tanto técnica como económicamente, para alcanzar dicho objetivo. Además, presenta la mejor relación entre costos y beneficios.

Para lograr la especificación técnica de pararrayos para una línea de transmisión de cualquier nivel de voltaje es indispensable tratar temas como la naturaleza de los sobrevoltajes y las descargas electroatmosféricas.

3.1. Naturaleza de los sobrevoltajes

Para efectos prácticos, un sobrevoltaje puede considerarse como cualquier voltaje entre fase y tierra o entre fases cuyo valor pico excede el valor pico del voltaje máximo de operación del sistema, en donde el voltaje máximo del sistema es el máximo voltaje de línea eficaz que puede ser mantenido en condiciones normales de operación y en cualquier punto del sistema.

Para el caso de un sistema con voltaje nominal de 230 kV y voltaje máximo de 242 kV, cualquier valor arriba de $\sqrt{2} \cdot 242 / \sqrt{3}$ kV (fase a tierra) ó $\sqrt{2} \cdot 242$ kV (fase a fase) se considera sobrevoltaje.

3.1.1. Sobrevoltajes temporales

Se originan por fallas en líneas de transmisión, operaciones de maniobra (por ejemplo, rechazo de carga), efecto ferranti, condiciones de resonancia, no linealidades de los equipos (ferroresonancias) o combinación entre estos factores.

Los sobrevoltajes temporales se caracterizan por ser de frecuencia fundamental y naturaleza oscilatoria, de baja amplitud (por lo general inferior a 1.5 p.u.), duración relativamente larga (tiempo de duración superior a decenas de milésimos de segundo) y débilmente amortiguada o no amortiguada.

En el caso de los pararrayos, los sobrevoltajes temporales tienen fundamental importancia en la definición del voltaje nominal, debido a la necesidad de que sea capaz de absorber la energía asociada a dichos sobrevoltajes.

Para propósitos de coordinación de aislamiento, la onda de sobrevoltaje temporal representativa se considera como la forma de voltaje normalizado de frecuencia fundamental de corta duración (1 minuto). Su amplitud se define por un valor máximo que se acepta y tiene en cuenta: la amplitud y la duración del sobrevoltaje real en servicio y la característica amplitud/duración de la soportabilidad a la frecuencia fundamental del aislamiento considerado.

El cortocircuito monofásico es la falla de más ocurrencia en los sistemas de potencia, y el fenómeno de una fase a tierra en cualquier punto del sistema aparece en la elevación de voltaje en las fases sanas, estando la amplitud directamente relacionada con el tipo de aterramiento del neutro del sistema en el punto considerado. La duración de la sobretensión corresponde a la duración de la falla.

Las amplitudes de los sobrevoltajes temporales debido a las fallas que se presentan en los sistemas pueden ser determinados de forma simplificada por la expresión: $TOV_{del\ sistema} = K * V_{max}/\sqrt{3}$, en la cual $TOV_{del\ sistema}$ es la amplitud de la sobretensión en el punto de referencia, K es el factor de sobrevoltaje o aterramiento (el cual depende del tipo de aterramiento del neutro del sistema) y V_{max} es la amplitud del máximo voltaje de fase a fase de operación del sistema antes de ocurrir la falla.

Despreciando el efecto resistivo de la falla, el factor de aterramiento para una falla fase a tierra se define por la expresión $K = 0.5 * (((3*Z_0/Z_1) / (3 + Z_0/Z_1)) \pm j\sqrt{3})$ en donde Z_0 es la impedancia de secuencia cero del sistema ($Z_0 = R_0 + jX_0$) y Z_1 es la impedancia de secuencia positiva del sistema ($Z_1 = R_1 + jX_1$).

La duración de los sobrevoltajes debido a una falla fase a tierra para un sistema efectivamente aterrado es normalmente inferior a los 0.2 segundos para protección de línea. La tabla XI muestra los valores típicos de los factores de aterramiento para los diferentes tipos de sistemas.

Tabla XI. Valores típicos de los factores de aterramiento

Tipo de Sistema	Caracterización	Factor de aterramiento K
A	Multi aterrado	≤ 1.3
B	Eficazmente aterrado	≤ 1.4
C	Ineficazmente aterrado	1.73
D	Aislado	≥ 1.73 (1.90)

Fuente: Normas IEC.

3.1.2. Sobrevoltajes transitorios

Los sobrevoltajes transitorios se caracterizan por ser sobrevoltajes de corta duración, de algunos milésimos de segundo o menos, oscilatorios o no oscilatorios, generalmente fuertemente amortiguados. Se clasifican en: sobrevoltajes de frente lenta, sobrevoltajes de frente rápido, sobrevoltajes de frente muy rápido y sobrevoltajes combinados (frente lenta, rápido y muy rápido).

3.1.2.1. Sobrevoltajes transitorios de frente lenta

Este tipo de sobrevoltaje es generalmente unidireccional, con tiempo hasta el pico tal que $20 \mu s \leq T_1 \leq 500 \mu s$, y tiempo hasta el medio valor (en la cola) $T_2 \leq 20 \text{ ms}$. Estos sobrevoltajes se pueden originar por fallas, maniobras de operación o por descargas electroatmosféricas directas en los conductores de fase de las líneas de transmisión.

En el caso de descargas electroatmosféricas que inciden en los conductores de fase de las líneas de transmisión, los sobrevoltajes de frente lenta ocurren cuando la corriente de rayo que incide sobre el conductor es suficientemente baja para no provocar el flameo del aislamiento de la línea, y cuando la descarga ocurre a una distancia suficientemente grande del punto considerado, de manera que se origina un sobrevoltaje de menor amplitud y de frente lenta, en virtud de los efectos de atenuación y distorsión de la onda de voltaje.

Para propósitos de coordinación de aislamiento, una forma de onda de voltaje representativa es el impulso de maniobra normalizado utilizado en los ensayos, representando tiempos hasta el pico de $250 \mu s$ y tiempo hasta el medio valor de $2,500 \mu s$.

3.1.2.2. Sobrevoltajes transitorios de frente rápida

También este sobrevoltaje transitorio es generalmente unidireccional, con tiempo hasta el pico tal que $0.1 \mu\text{s} \leq T_1 \leq 20 \mu\text{s}$, y tiempo hasta el medio valor (en la cola) $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$. Al igual que los sobrevoltajes de frente lenta, los sobrevoltajes de frente rápida son originados por fallas, maniobras de operaciones o descargas electroatmosféricas que inciden en las subestaciones o directamente en los conductores de fase de las líneas aéreas de transmisión, en los cables de guarda o en las estructuras mismas; también se originan por descargas a tierra o en estructuras próximas a la línea considerada (sobrevoltajes inducidos).

Para fines de coordinación de aislamiento, la forma de onda de voltaje representativa es el impulso atmosférico normalizado utilizado en los ensayos, representando tiempos hasta el pico de $1.2 \mu\text{s}$ y tiempo hasta el medio valor de $50 \mu\text{s}$. La amplitud representativa es dada como un valor máximo que se presupone o por una distribución de probabilidad de valores de pico en función del índice de retorno de los sobrevoltajes.

3.1.2.3. Sobrevoltajes transitorios de frente muy rápida

Los sobrevoltajes de frente muy rápida son generalmente unidireccionales, con tiempo hasta el pico tal que $T_1 \leq 0.1 \mu\text{s}$, duración total $\leq 3 \text{ ms}$, y con oscilaciones superpuestas de frecuencias $30 \text{ kHz} \leq f \leq 100 \text{ MHz}$. Este tipo de sobrevoltaje puede originarse por fallas o por la operación de seccionadores en subestaciones aisladas por gas (GIS), debido a la disrupción rápida del aislamiento gaseoso. La representación del sobrevoltaje transitorio de frente muy rápido aún no se ha establecido en el laboratorio, en virtud de que, hasta el momento, no se cuenta con patrones adecuados para lograrla.

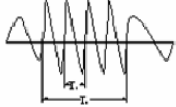
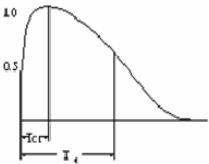
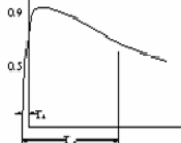
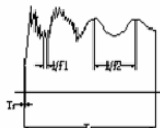
3.1.2.4. Sobrevoltajes transitorios combinados

Los sobrevoltajes transitorios combinados consisten en dos componentes de voltaje simultáneamente aplicados entre cada uno de los terminales de fase de un aislamiento fase a fase y tierra; quedan definidos por el componente de mayor valor de pico. Pueden originarse de la mezcla entre sobrevoltajes de frente lenta, rápida y muy rápida, y se presentan entre las fases de un sistema (fase a fase) o fase a tierra.

3.2. Descargas electroatmosféricas en líneas de transmisión

Las descargas electroatmosféricas son la principal causa de salidas forzadas en las líneas de transmisión con voltajes nominales de hasta 230 kV. Estos índices pueden ser más críticos en regiones con altos niveles cerámicos y elevados valores de resistencia al suelo.

Figura 5. Representación de las clases y formas de onda de sobrevoltajes

Clase	Sobrevoltaje temporal	Sobrevoltaje de frente lenta	Sobrevoltaje de frente rápida	Sobrevoltaje de frente muy rápida
Forma de onda				
Normalizado	48 Hz ≤ f ≤ 62 Hz Tt = 60 segundos	Tcr = 250 μs Tc = 2500 μs	T1 = 1.2 μs T2 = 50 μs	No especificado

Fuente: Normas IEC.

En general, una descarga electroatmosférica en una línea de transmisión puede ser definida como una descarga eléctrica transitoria de corta duración y con una elevada corriente asociada, que normalmente alcanza varios kilómetros de extensión.

Una descarga electroatmosférica ocurre cuando en una región de la atmósfera hay nubes que alcanzan una cantidad suficiente de cargas eléctricas para dar origen a campos eléctricos cuya intensidad es mayor a la rigidez dieléctrica del aire, provocándose de esa forma la disrupción del medio (aire). Para que este proceso pueda acontecer es necesario que las condiciones ambientales sean favorables al fenómeno, situación que puede ser encontrada en grandes tormentas de nieve y arena, en las nubes sobre volcanes en erupción y, la mayor parte de las veces, en la nube de tempestad (colmo - nimbus).

Entre los tipos de descargas existentes, la de interés para el análisis de la actuación de los sistemas eléctricos de potencia corresponde a las descargas entre nube y suelo, las cuales pueden ser clasificadas como descargas ascendentes y descendentes (según la dirección de la evolución del canal que hace el cierre del trayecto ionizado) o descargas positivas y negativas (según la polaridad de la carga en la nube conectada al suelo por ese trayecto).

De manera general, en regiones planas es más frecuente la ocurrencia de descargas negativas y descendentes. Las descargas ascendentes son menos frecuentes y ocurren a partir de estructuras demasiado altas, como las torres de telecomunicaciones, edificaciones, mástiles, entre otras (principalmente cuando se sitúan en lo alto de regiones montañosas).

Como se analizó en el capítulo 2, la línea de transmisión 230 kV Brillantes - La Esperanza está expuesta a sufrir salidas forzadas por descargas electroatmosféricas, principalmente debido a que el ángulo de blindaje de diseño no es de protección total, se encuentra expuesta a la incidencia de rayos debido a los altos niveles cerámicos por las regiones donde atraviesa y los valores de resistencia al pie de la torre aumentan la probabilidad de generar voltajes de flameo inverso.

3.3. Pararrayos

El objetivo fundamental de cualquier dispositivo para la protección contra sobrevoltajes es la de reducir las amplitudes de los sobrevoltajes de frente lenta y rápida en los terminales de los equipos o sistemas protegidos según los niveles preestablecidos y operacionalmente aceptables, de modo que, después de que desaparezcan dichos sobrevoltajes, el asilamiento de los equipos o sistemas no sufra daños.

Existen algunos dispositivos para la protección de sobrevoltajes, entre los cuales los pararrayos se presentan como los más eficaces, tanto desde el punto de vista económico como técnico.

El pararrayos ideal, como dispositivo de protección contra sobrevoltajes, se define según las siguientes características:

- a) Posee una impedancia infinita entre sus terminales en condiciones de régimen permanente del sistema, o sea, se comporta como circuito abierto hasta que ocurre un sobrevoltaje en el sistema.

- b) Tiene la capacidad instantánea de entrar en conducción cuando se presenta un sobrevoltaje con un valor próximo al del voltaje nominal del sistema, manteniendo dicho nivel de voltaje de inicios de conducción durante toda la ocurrencia del sobrevoltaje.

- c) Es capaz de parar de conducir, o sea, retorna a la condición de circuito abierto una vez el voltaje del sistema regrese a su estado de operación nominal.

La operación del pararrayos no debe causar ningún disturbio de degradación al sistema o al propio dispositivo de protección, y se debe tomar en cuenta que los pararrayos actualmente disponibles no tienen la capacidad de operar plenamente con las características del pararrayos ideal.

3.3.1. Pararrayos de carburo de silicio (SiC)

Estos pararrayos actualmente ya no se fabrican, aunque todavía se encuentran instalados en muchas subestaciones. A estos pararrayos se les denomina tipo “válvula”, y están formados básicamente por centelladores montados en serie con resistores no lineales (denominados en las normas ANSI como elementos válvula).

Varios tipos de materiales fueron empleados al inicio para el diseño de los resistores no lineales, tales como hidróxido de aluminio, óxido de hierro y sulfato de plomo. Posteriormente se desarrollaron resistores lineales de carburo de silicio, formado a partir de los cristales de carburo de silicio.

3.3.2. Pararrayos de óxido de cinc (ZnO) sin centelladores

La tecnología de los pararrayos con pastillas (varistores) de SiC llega hasta finales de la década de los años sesenta, cuando un nuevo tipo de dispositivo caracterizado por bajos niveles de voltaje y energía es desarrollado para la protección contra sobrevoltajes.

El nuevo dispositivo formado por elementos en la base de óxido de cinc (ZnO) y pequeñas cantidades de otros óxidos metálicos adicionados al ZnO presentan un elevado grado de no linealidad en su característica “voltaje versus corriente”, brindando a los elementos ZnO bajos valores de corriente en la región de operación, asociado a una buena estabilidad cuando continuamente se requiere del voltaje normal de operación, aparte de alta capacidad de absorción de energía. Los pararrayos de óxido de cinc están contruidos básicamente por un conjunto de resistores no lineales en la base de ZnO.

La ausencia de los centelladores (elementos indispensables en el montaje de los pararrayos de carburo de silicio) en este tipo de pararrayos, se debe a la elevada no linealidad en la característica “voltaje versus corriente” de los elementos ZnO, asociada a su elevada estabilidad térmica y a su notable capacidad de absorción de energía para sobretensiones temporales y transitorias.

A mediados de la década de los años ochenta surge una evolución tecnológica muy significativa: la utilización de pararrayos de óxido de cinc con envoltorios poliméricos. Hasta ese entonces, prácticamente todos los pararrayos empleaban envoltorio de porcelana.

Diversos estudios realizados apuntan que la penetración de humedad debido a la pérdida de estanqueidad y fragmentación con o sin explosión del envoltorio de porcelana es la principal causa de falla verificada en los pararrayos a lo largo del tiempo, problema que se elimina con la utilización de pararrayos con envoltorio polimérico.

El pararrayos de óxido de cinc con envoltorio polimérico, por el hecho de presentar menor peso, mayor facilidad y flexibilidad en el montaje, y por la no fragmentación o explosión de dicho envoltorio con desprendimiento de los elementos de ZnC, ha sido instalado más próximo a los equipos a proteger, mejorando de forma considerable las características de protección de esos equipos cuando se presentan sobretensiones electroatmosféricas de frente rápido, a través de la reducción de voltajes impulsivos en sus terminales, debido a la menor extensión de los cables de conexión y la menor distancia de los pararrayos a los equipos, siendo muy práctica, en algunos casos, la instalación de pararrayos directamente en las terminales de los transformadores.

La relación entre la capacidad de absorción de energía y la corriente de descarga que fluye por el pararrayos, es un factor importante que se debe considerar para condiciones de maniobra. La capacidad de absorción de energía presenta una dependencia con las características de la corriente de descarga: una menor capacidad de absorción de energía es obtenida para los elementos ZnO cuando ocurren impulsos de corriente con menores duraciones.

La capacidad de absorción de energía generalmente es especificada por el fabricante en términos de kJ/kV (nominal o del MCOV) y está asociada a un impulso de corriente con forma de onda y amplitud de corriente definida.

3.4. Principio de funcionamiento de los pararrayos de línea

Al igual que la protección de los equipamientos en las subestaciones, los pararrayos de línea se conectan eléctricamente en paralelo con las cadenas de aislamiento, y su principio de operación consiste en la reducción de las sobretensiones transitorias resultantes, que se establecen en las terminales de dichas cadenas, anticipando que los niveles de aislamiento sean excedidos.

Cuando ocurre una descarga electroatmosférica en la estructura, en el cable de guarda o en los conductores de fase, una parte de la corriente de rayo fluye por el pararrayos, la cual da origen a un voltaje residual entre sus terminales que limita el voltaje resultante en la cadena de aislamiento, con lo cual se tiene la necesidad de coordinar los niveles de protección del pararrayos con los niveles de descarga de las cadenas a ser protegidas.

Por el pararrayos circula la corriente de rayo, cuya amplitud depende básicamente de la amplitud y de la forma de corriente de descarga, de la impedancia transitoria del sistema de aterramiento y de la impedancia de los cables de guarda, retornando a las condiciones normales de operación después del pasaje del transitorio, cuya duración es del orden de centenas de microsegundos.

En virtud de las características no lineales de los elementos de óxido de cinc (ZnO) utilizados en el montaje de los pararrayos de línea, la corriente que fluye por el pararrayos después del pasaje de la corriente de descarga presenta bajas amplitudes, no superiores a algunos mA, magnitud que no es suficiente para activar el dispositivo de protección contra sobrecorriente. Por consiguiente, el dispositivo de protección de sobrecorriente no “ve” la operación de los pararrayos.

Al no existir interrupción del aislamiento y debido a la baja corriente que circula por el pararrayos después del pasaje de la corriente de descarga, no hay actuación del dispositivo de protección contra sobrecorrientes en la fase protegida por el pararrayos, no existiendo, por consiguiente, variación momentánea de voltaje debido a las descargas electroatmosféricas.

Una estructura que esté protegida en todas sus fases por medio de pararrayos, no debe experimentar variación instantánea de voltaje por la incidencia de descargas electroatmosféricas en dicho punto; sin embargo, pueden ocurrir descargas disruptivas pueden ocurrir en las estructuras adyacentes, dependiendo de las características de los sistemas de aterramiento de dichas estructuras.

La explosión o fragmentación del envoltorio que pueden causar riesgos a las personas próximas o provocar daños acentuados a los equipamientos adyacentes, también son prácticamente eliminadas. Este aspecto es importante en la definición de los procedimientos de instalación y mantenimiento de pararrayos sin centelladores externos en línea viva.

Se instalan desconectores automáticos de línea, en serie con el pararrayos, para aislar el pararrayos del sistema, en caso de su eventual falla. Adicionalmente, los proyectos de pararrayos poliméricos sin espacios internos de aire presentan menor peso con relación a los de porcelana (en general menos de 50% del peso), acarreado menores esfuerzos mecánicos sobre las estructuras y brindando una mayor versatilidad en el montaje de las disposiciones. Los pararrayos con envoltorio polimérico pueden, invariablemente, ser instalados sobre las líneas existentes sin la necesidad de refuerzo de las estructuras.

3.5. Criterios para la selección de pararrayos poliméricos de línea

El desempeño adecuado de los pararrayos en las líneas está condicionado al correcto dimensionamiento de sus características con relación al sistema, de tal forma que se pueden seguir los siguientes pasos:

- a) Voltaje nominal y máximo voltaje continuo de funcionamiento (MCOV), definidos por el máximo voltaje fase-tierra del sistema y por el máximo sobrevoltaje temporal en el punto de aplicación de los pararrayos y su respectiva duración
- b) Voltajes residuales para impulsos de corriente empinado y electroatmosféricos, los cuales deben estar coordinados con los niveles de soportabilidad de las cadenas aislantes
- c) Capacidad de absorción de energía, definida por la amplitud, forma de onda y duración de las descargas, por la impedancia transitoria del sistema de aterramiento y por el efecto de las descargas múltiples
- d) Capacidad de soportabilidad mecánica a la fragmentación y al desprendimiento de la parte activa, en función de las máximas corrientes de falla en la línea analizada

El efecto de la contaminación también debe ser tomado en consideración durante la fase de estudio. En el caso de los pararrayos sin centelladores externos, deben ser dimensionados con una distancia de fuga suficiente para que su comportamiento bajo contaminación sea equivalente o superior a la cadena de aislamiento instalada en paralelo.

Se han reportado bajos índices de fallas en pararrayos para línea, siendo la mayoría de las fallas eléctricas atribuidas a demandas excesivas de energía por descargas atmosféricas y sobretensiones temporarias.

3.6. Especificaciones técnicas y selección del pararrayos para la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza

Para la selección del pararrayos a implementar en la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza, es importante tomar en cuenta la siguiente información para poder elegir, entre las opciones posibles, el de mayor eficiencia y protección para dicha línea:

- Voltaje Nominal: 230 kV (fase a fase)
- Voltaje máximo del sistema: 242 kV (fase a fase)
- Valores típicos de resistencia al pié de la torre: 4, 5, 7, 10, 13 y 15 Ω
- Voltaje disruptivo crítico de polaridad negativa del aislamiento: $V_{CFO} = 1,510$ kV
- Sobrevoltaje temporal de frecuencia fundamental del sistema : TOV = 320 kV
- Duración del sobrevoltaje temporal de frecuencia fundamental: 4 segundos.
- Impedancia de secuencia cero o monofásica: $Z_0 = 400 \Omega$

a) Se define el MCOV del pararrayos:

$$\text{MCOV} \geq 242/\sqrt{3} \geq 139.7 \text{ kV}$$

b) Se calcula la corriente nominal de descarga, para lo cual es indispensable tomar en cuenta:

- La importancia de la línea de transmisión y el grado de protección deseado: cuando hay mayores corrientes de descarga del pararrayos se aumenta la confiabilidad de la protección. La línea 230 kV Brillantes - La Esperanza, debido a la confiabilidad y disponibilidad que debe presentar para la estabilidad del sistema occidental, es estratégica.
- El nivel de aislamiento de la línea: las líneas que se encuentran deficientemente aterradas elevan las corrientes de descargas electroatmosféricas. La línea 230 kV Brillantes - La Esperanza, por presentar terrenos de alta resistividad, queda expuesta a dichas elevaciones de corriente.
- La probabilidad de ocurrencia de las descargas electroatmosféricas de amplitud elevada: zonas de alta densidad de descarga a tierra tienen probabilidad de elevadas corrientes de descarga, situación que se presenta en la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza.
- Desempeño de la línea y condiciones ambientales: las corrientes de descargas electroatmosféricas y su tasa de crecimiento son funciones de las tasas de ocurrencia de las descargas de retorno y de las tasas de falla del blindaje. Las mayores tasas de falla aumentan la probabilidad de corrientes de descarga y, por lo tanto, aumenta la corriente nominal de descarga del pararrayos.

En el caso de la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza, que emplea cable de guarda (aunque, como se ha verificado, el ángulo de blindaje no garantiza protección total), las descargas directas se convierten en el segundo factor de salidas no deseadas, siendo las descargas de retorno el principal factor de disrupción del aislamiento.

De acuerdo a la experiencia de otros países, para voltajes nominales operativos de hasta 420 kV se emplean pararrayos con $I_{ND} = 10$ kA, y para voltajes arriba de 420 kV se emplean pararrayos con corriente nominal de descarga de 20 kA. Por lo anteriormente indicado, la corriente nominal del pararrayos se toma igual a: $I_{ND} = 10$ kA.

c) Se procede a la elección preliminar de uno o más pararrayos, evaluando inicialmente los que cumplan las condiciones: $MCOV \geq 139.7$ kV e $I_{ND} = 10$ kA. Para efecto de análisis de la línea Brillantes - La Esperanza, elegimos dos pararrayos con las especificaciones que se muestran en la tabla XII.

Tabla XII. Características eléctricas de pararrayos

Voltaje Nominal V_N (kV)	MCOV (kV)	V_r impulso empinado 10 kA máximo 0.5 μ s (kV)	V_r impulso de maniobra 500 A máximo (kV)	V_r impulso atmosférico 10 kA 8/20 μ s (kV)	Distancia de fuga (mm)
172	140	620.5	399.5	544.0	6,649.72
180	144	657.0	423.0	576.0	7,040.88

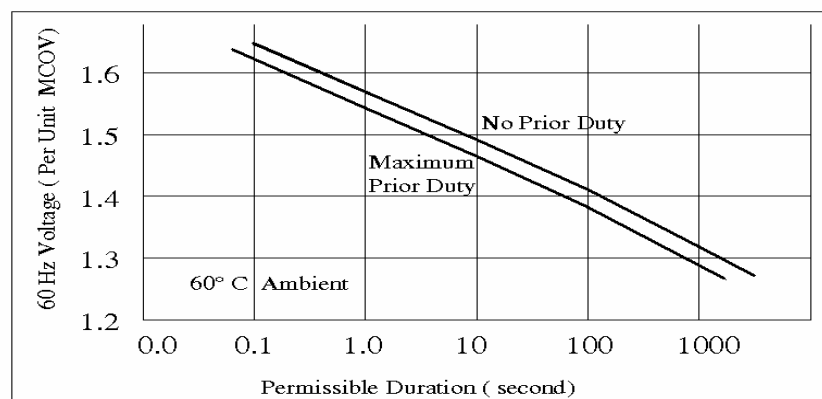
Fuente: Catálogo Ohio Brass de pararrayos para línea.

d) Se verifica que la característica de soportabilidad del pararrayos para sobretensiones temporales esté por encima de las sobretensiones que se presentan en el sistema, verificando que: $TOV_{\text{sistema}} / MCOV_{\text{pararrayos}} \geq TOV_{\text{pararrayos}} / MCOV_{\text{pararrayos}}$.

Para los pararrayos con MCOV de 140 kV y 144 kV se tiene que: $TOV_{\text{sistema}} / V_{N\text{pararrayos}} \geq (320/\sqrt{3})/140 = 1.32$ y $TOV_{\text{sistema}} / V_{N\text{pararrayos}} \geq (320/\sqrt{3})/144 = 1.28$, respectivamente.

Localizando el punto de operación de los pararrayos en la figura 6, que es la gráfica de soportabilidad (sobretensión frecuencia fundamental versus tiempo), cortando en el eje de las ordenadas ($TOV_{\text{pararrayos}} / MCOV_{\text{pararrayos}}$) los puntos 1.32 y 1.28 ($TOV_{\text{sistema}} / MCOV_{\text{pararrayos}}$) y en el eje de las abscisas el tiempo de 4 segundos (que es la duración de la sobretensión temporal), se puede verificar que dicho punto de operación se encuentra por debajo de la curva de operación que recomienda el fabricante, por lo que ambos tienen capacidad para operar con el sobrevoltaje de frecuencia fundamental del sistema ($TOV = 320$ kV) con duración de 4 segundos.

Figura 6. Sobretensión de frecuencia fundamental versus tiempo



Fuente: Catálogo Ohio Brass de pararrayos para línea.

e) Seguidamente, se procede al cálculo de la corriente que circula por el pararrayos, por medio de la expresión: $I = (2.4 \cdot V_{CFO} - V_r) / Z_o$, en donde $V_{CFO} = 1,510$ kV; para el pararrayos con V_r de 544 kV la corriente es de 6.19 kA, y para el pararrayos con V_r de 576 kV la corriente es de 6.11 kA.

Con los anteriores resultados se puede concluir que los pararrayos analizados con corriente nominal de descarga $I_{ND} = 10$ kA pueden operar correctamente, en virtud de que las corrientes que circularán por ellos son de magnitudes menores, como se ha calculado.

Además, cuando se presenten las corrientes de rayo, tomando en cuenta que los voltajes residuales de los pararrayos son menores a los voltajes de flameo del aislamiento polimérico, se espera que no haya disrupción por dicho aislamiento.

f) Para determinar la capacidad de absorción de energía del pararrayos es necesario calcular inicialmente la energía a disipar en el mismo, aplicando la expresión: $E_{pararrayos} = (2 \cdot V_{CFO} - V_r(1 + \ln(2 \cdot V_{CFO} / V_r))) \cdot V_r \cdot T_d / Z_o$, en la cual V_{CFO} es el voltaje disrruptivo crítico de polaridad negativa del aislamiento (1,510 kV), V_r es el voltaje residual del pararrayos para impulso atmosférico de 10 kA (8/20 μ s), T_d es el tiempo de duración de la corriente de descarga electroatmosférica, incluyendo la primera descarga y las subsecuentes (en segundos), cuyo valor típico 300 μ s, y Z_o es la impedancia de secuencia cero o monofásica (400 Ω).

Para el pararrayos con V_r de 544 kV la $E_{pararrayos} = 629.76$ kJ y para el pararrayos con V_r de 576 kV la $E_{pararrayos} = 643.52$ kJ, la capacidad de absorción de energía de un pararrayos está dada como: $E_{pararrayos} / V_N$, por lo que para el pararrayos con V_r de 544 kV la capacidad de absorción de energía es 3.66 kJ/kV y para el pararrayos con V_r de 576 kV la capacidad de absorción de energía es 3.57 kJ/kV.

De acuerdo con la IEC, para pararrayos de clase 2 existe una faja de variación de 2.9 a 4.5 kJ/kV nominal en la capacidad de absorción de energía del pararrayos. De la misma forma, para la clase 3, la faja está entre 4.2 y 8.0 kJ/kV nominal. Generalmente la práctica demuestra que los pararrayos con capacidad de absorción de energía mínima de 3.5 kJ/kV nominal son adecuados para la mayoría de los sistemas con tensiones nominales de hasta 138 kV. Para sistemas de 230 kV, los pararrayos con una capacidad mínima de absorción de energía de 7.0 kJ/kV nominal responden satisfactoriamente.

Aplicando un factor de seguridad igual a 2, a las capacidades de absorción de energía de los pararrayos analizados para la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza, se tiene que para el pararrayos con $V_N = 172$ kV se necesita una capacidad mínima de absorción de energía de 7.32 kJ/kV, y para el pararrayos con $V_N = 180$ kV se necesita una capacidad mínima de absorción de energía de 7.14 kJ/kV.

Las normas IEC establecen que un pararrayos típico clase 3 tiene una capacidad de absorción de energía de 7.4 kJ/kV nominal; por lo tanto, se puede fijar en 7.4 kJ/kV nominal la capacidad de absorción de energía mínima del pararrayos a implementar en la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza.

g) Es muy importante calcular la corriente de cortocircuito a la que el pararrayos se somete, para que el fabricante determine la soportabilidad mecánica a la fragmentación y al desprendimiento de la parte activa. En el caso de pararrayos de línea poliméricos que presenten espacios internos de aire entre los elementos activos y la parte interna del envoltorio polimérico, el dispositivo de alivio de presión debe actuar. En el caso de pararrayos poliméricos sin espacios internos de aire, se deben considerar los esfuerzos mecánicos que puede ocasionar la corriente de cortocircuito, de tal forma que no se produzca liberación o desprendimiento de la parte interna activa.

Se emplea la expresión: $I_{cc} = P_{cc} \text{ (MVA)} / \sqrt{3} * V_{\text{nominal del sistema}}$; por lo tanto, se tiene que para una $P_{cc} =$ de 1,235 MVA en la línea Brillantes - La Esperanza, la corriente de cortocircuito es aproximadamente: $I_{cc} = 3,100 \text{ A}$.

h) El efecto de la contaminación debe ser considerado en los pararrayos, dimensionado una distancia de fuga suficiente para que su comportamiento bajo contaminación sea igual o superior al de la cadena aislante. El aislamiento empleado en la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza tiene distancias de fuga para el tipo poste 6,350 mm, para el tipo suspensión 6,010 mm. El pararrayos con V_N de 172 kV tiene distancia de fuga igual a 6,650 mm y el pararrayos con V_N de 180 kV tiene distancia de fuga de 7,041 mm, con lo cual se verifica que los mismos son adecuados para operar con el aislamiento polimérico de la línea.

i) El nivel de protección de los pararrayos analizados se encuentra por medio de la expresión: $NP = ((BIL - V_r) / BIL) * 100\%$; para la línea Brillantes - La Esperanza, el BIL del aislamiento es 1,432 kV; por lo tanto, para el pararrayos con V_r de 544 kV el nivel de protección es 62% y para el pararrayos con V_r de 576 kV el nivel de protección es de 59.8%. Ambos niveles son aceptables, ya que el mínimo requerido es un margen del 20%, teniéndose que el pararrayos con mayor nivel de protección desarrolla más operaciones a lo largo de su vida útil.

Con base en los cálculos desarrollados y tomando en cuenta que para la especificación del pararrayos a implementar en la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza se han tomado como referencia dos pararrayos de un fabricante en particular, cuyas características eléctricas están definidas, se toma la decisión de seleccionar el pararrayos que presenta menor nivel de protección, respecto del cual, por tener menos operaciones durante su vida útil, se considera que esta se prolonga.

Las especificaciones del pararrayos seleccionado aparecen en la tabla XIII, con la observación de que cualquiera de los dos pararrayos analizados tienen la capacidad para operar con las solicitudes de la línea Brillantes - La Esperanza.

Es importante mencionar que se pueden hacer más análisis con pararrayos de diferentes fabricantes, pero la relevancia de este estudio es crear una guía para la selección de pararrayos de línea en general, situación por la cual el pararrayos que aquí se ha especificado se considera adecuado, al igual que posiblemente otros más, para operar y proteger a la línea objeto de análisis.

Tabla XIII. Características eléctricas para solicitar el pararrayos de la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza

Voltaje nominal V_N :	180 kV
MCOV:	144 kV
Corriente nominal de descarga I_{ND} :	10 kA
Clase 3 (capacidad de absorción de energía mínima):	7.4 kJ/kV
Corriente de falla del sistema (I_{cc}):	3,100 A
Voltaje residual (V_r) para impulso empinado 10 kA máximo 0.5 μ s :	657 kV
Voltaje residual (V_r) para impulso de maniobra 500 A máximo:	423 kV
Voltaje residual (V_r) para impulso atmosférico 10 kA 8/20 μ s:	576 kV
Distancia de fuga superior a:	6,350 mm
Altura máxima de operación:	2,500 m.s.n.m.

Fuente: Elaboración del autor.

4. MÉTODOS PARA LA INSTALACIÓN DE PARARRAYOS EN LA LÍNEA 230 KV BRILLANTES - LA ESPERANZA

La selección de las estructuras para el montaje de los pararrayos, así como las fases a proteger a lo largo de una línea de transmisión o en algunos tramos críticos, está directamente relacionada con el índice de mejoría de actuación que se desea alcanzar, y depende de muchos factores, tales como los registros de las salidas forzadas, características constructivas, conocimiento de la topografía y de la densidad de descargas a tierra (o niveles ceraúnicos) de las regiones por donde atraviesa la línea, importancia de la línea y cargas que alimenta, ubicación de estructuras con incidencia de descargas electroatmosféricas, etc.

Con el objetivo de lograr una mejor definición de los puntos de instalación de los pararrayos para conseguir una mejor actuación de la línea, el análisis técnico debe ser acompañada por el estudio económico, lo cual permite analizar la opción más viable.

La instalación de pararrayos en tramos críticos de las líneas, por ejemplo en estructuras ubicadas en regiones montañosas en donde los suelos presentan elevadas resistividades, reduce el índice de salidas forzadas de tipo transitorio.

En algunos casos se vuelve indispensable la aplicación de pararrayos a lo largo de toda la línea, principalmente cuando esta se encuentra, como anteriormente se menciona, en regiones que presentan suelos de alta resistividad y elevadas actividades electroatmosféricas.

En casos particulares, en donde las salidas forzadas de línea no son permitidas (el índice deseado es de cero salidas por 100 km al año), se instalan pararrayos en las tres fases a lo largo de toda la línea de transmisión.

4.1. Instalación de pararrayos en estructuras ubicadas en regiones con suelos de elevada resistividad

La resistividad del suelo y la impedancia de aterramiento tienen influencia directa en el índice de salidas de líneas que emplean cables de guarda, debido a las descargas de retorno o voltajes de flameo inverso.

Los tratamientos a los sistemas de tierra para mejorar la resistencia al pie de la estructura resultan inviables tanto técnica como económicamente, por lo que la instalación de pararrayos resulta indispensable.

Para una región con topografía y densidades de descarga a tierra constante, se considera una probabilidad de igual ocurrencia de descargas electroatmosféricas a lo largo de todas las estructuras de dicha región.

4.2. Instalación de pararrayos en estructuras ubicadas en regiones montañosas

Las estructuras que se encuentran ubicadas en lo alto de regiones montañosas presentan una mayor probabilidad de incidencia de descargas electroatmosféricas, además de que los suelos muestran elevada resistividad y propician elevadas resistencias al pie de la estructura. Son comunes los voltajes de flameo inverso en el aislamiento de las estructuras ubicadas en regiones montañosas.

4.3. Instalación de pararrayos en estructuras próximas a subestaciones

Ante la ocurrencia de una descarga disruptiva de retorno en las cadenas de aislamiento que se encuentran en las última torres y cercanas a la subestación, se originan ondas viajeras de voltaje, las cuales llegan a la subestación con niveles de crecimiento demasiado empinadas que ocasionan voltajes impulsivos elevados en los terminales de los equipos instalados en la subestación, debido al efecto de la distancia entre los pararrayos tipo subestación y dichos equipos.

Con la aplicación de pararrayos en las últimas estructuras antes de la llegada a las subestaciones, se elimina el peligro de la ocurrencia de voltajes de flameo inverso en líneas que emplean cables de guarda.

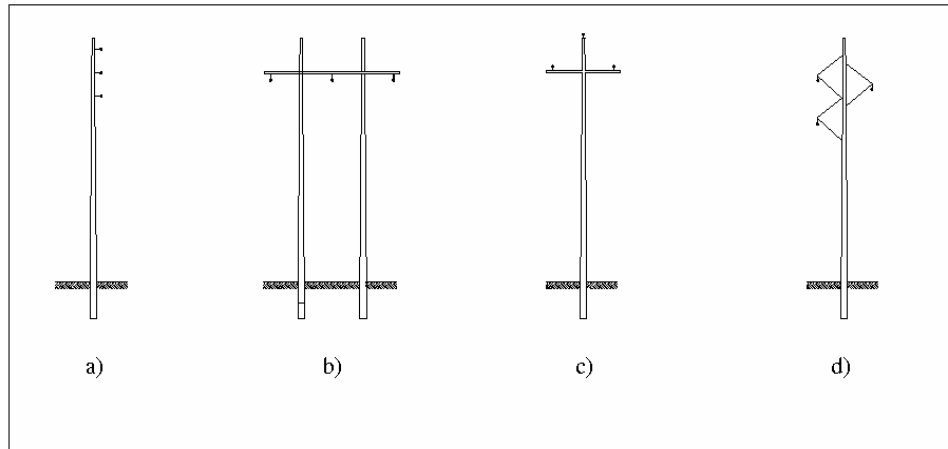
4.4. Instalación de pararrayos en líneas nuevas sin cables de guarda

La aplicación de pararrayos en nuevos proyectos de líneas de transmisión es estudiada por empresas de transporte de energía, principalmente cuando las líneas o tramos cruzan regiones con elevada resistividad del terreno y alta densidad de descargas a tierra.

Entre las empresas de transporte de energía, algunas vienen evaluando, durante la fase del proyecto de una nueva línea, la no utilización de cables de guarda e implementando pararrayos en todas las estructuras, especialmente en líneas con voltajes nominales hasta 138 kV. Con esta disposición se hace posible utilizar estructuras de menor longitud y más livianas, con lo cual se reducen significativamente los costos de la línea.

Diversos análisis han demostrado que la no utilización de cables de guarda, para utilizar en su lugar pararrayos, resulta técnica y económicamente importante, primordialmente en áreas con bajos niveles cerámicos y suelos de baja \square isposición \square . En la figura 7 se presentan diferentes tipos de estructuras y la disposición de los conductores de fase en las mismas, desprovistas de cable de guarda.

Figura 7. Diferentes tipos de estructuras y disposición de los conductores



Fuente: Elaboración del autor.

4.4.1. Configuración vertical

En la figura 7.a se presenta una configuración vertical, en la que el conductor de fase superior ofrece un blindaje efectivo con relación a los otros conductores, caso en el cual la instalación de un pararrayos por estructura en la fase más alejada del nivel del suelo, generalmente presenta un desempeño similar al que se obtiene con la instalación de cables de guarda, quedando dicho desempeño en función directa del comportamiento transitorio del sistema de tierra.

El nivel de protección aumenta con la implementación de dos pararrayos por estructura, instalados en las fases superior e intermedia. Se obtiene una protección total con el montaje de pararrayos en las tres fases y en todas las estructuras.

4.4.2. Configuración horizontal

Este tipo de configuración se muestra en la figura 7.b. Sus conductores se encuentran a un mismo nivel, y es indispensable la instalación de pararrayos en las tres fases; sin embargo, la implementación de pararrayos en las fases más expuestas (fases exteriores) ofrece niveles aceptables de protección, dependiendo la actuación de la línea del comportamiento transitorio de la resistencia al pie de la estructura.

4.4.3. Configuración triangular

Cuando el conductor superior ofrece un blindaje efectivo con relación a los otros dos conductores, como en la figura 7.c, el procedimiento a emplear es igual al utilizado para configuraciones verticales.

En el caso de que el conductor más alto no ofrezca un blindaje efectivo a por lo menos uno de los conductores, como lo ilustra la figura 7.d, se deben instalar al menos dos pararrayos, uno en la fase más alta y el otro en la fase intermedia .

4.5. Instalación de pararrayos en líneas existentes con o sin cables de guarda

La implementación de pararrayos en líneas de transmisión da como resultado una mejoría en la actuación de las mismas, ya sea con o sin cables de guarda.

Es importante realizar el análisis del comportamiento correspondiente para determinar la cantidad y la correcta ubicación de los pararrayos a ser instalados a lo largo de una línea en particular.

Para líneas sin cable de guarda, los criterios para la instalación de pararrayos son similares a los descritos en la sección 4.4., que ejemplifica la instalación de pararrayos en líneas nuevas y sin cables de guarda.

En las líneas existentes y que emplean cables de guarda, el criterio para definir la localización de los pararrayos depende de:

- a) el sistema de tierras o valores de resistencia al pie de la estructura, de cuyos valores dependerá el voltaje de flameo inverso y, por consiguiente, la magnitud de la corriente de rayo que produce falla
- b) la actividad electroatmosférica de la región a lo largo de toda la línea o en tramos de la misma

La cantidad de pararrayos a instalar en una estructura depende de su configuración (vertical, horizontal, triangular) y de la posición de los conductores, así como también del grado de protección o de la actuación que se requiere en la línea (con la instalación de pararrayos en las tres fases de una estructura, se logra una mejor actuación en el desempeño de la línea).

4.6. Métodos considerados para la instalación de pararrayos en la línea Brillantes - La Esperanza

Con base en todo lo expuesto en las secciones anteriores y en virtud de que la configuración de la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza es predominantemente triangular (naturalmente también existen estructuras en configuración vertical de suspensión y tensión), la implementación de pararrayos de línea puede realizarse de diversas maneras. Dependiendo del grado de protección que se requiera, así será la cantidad de pararrayos a utilizar, como también el número de los postes donde se instalarán.

La elección de postes de configuración triangular tipo “S1” y “S2” (para vanos cortos y largos, respectivamente, ambos en tangente) para el montaje de pararrayos, obedece a que la sujeción o fijación mecánica del pararrayos al poste resulta de menor dificultad, comparado con un poste de suspensión o tensión de configuración vertical.

4.6.1. Implementación de pararrayos en todos los postes tipo “S1” y “S2”

Este método consiste en la implementación de pararrayos de línea en todos los postes de suspensión tipo “S1” y “S2” y en las tres fases, con lo cual se considera que las salidas forzadas por descargas electroatmosféricas tenderán a cero. En total se encuentran 121 postes de estos tipos, necesitándose, por lo tanto, 363 pararrayos para implementar este método.

También es posible que se logren reducir a cero las salidas forzadas por descargas electroatmosféricas instalando pararrayos en todos los postes de configuración triangular tipos “S1” y “S2”, y proteger solo dos, o una fase.

4.6.2. Implementación de pararrayos en postes previamente definidos tipos “S1” y “S2”

Una opción para la implementación de pararrayos sugiere que el montaje se lleve a cabo en los postes que presentan valores de resistencia de puesta a tierra igual o superior a 7Ω y protegiendo una sola fase por cada poste. Para desarrollar esta opción, se toma en cuenta que existen 111 postes tipo “S1” y “S2”, con lo cual la cantidad total de pararrayos a instalar es también de 111 unidades. Se proyecta que de las 4 salidas se salvan 3, teniendo entonces, anualmente, solo una salida, con duración de 15 minutos en total.

El montaje de pararrayos también puede llevarse a cabo en los postes que presentan resistencias de puesta a tierra superior a 14Ω , instalando dos pararrayos por cada poste. La cantidad de postes tipo “S1” y “S2” que se encuentran dentro del rango sugerido es de 23, necesitándose, por lo tanto, 46 pararrayos en total. Se considera que con este método se pueden evitar 2 salidas, con lo cual al año se tienen 2 indisponibilidades forzadas, con una duración de 15 minutos en promedio cada una.

Otro procedimiento para la instalación de pararrayos consiste en determinar los puntos críticos de la línea en donde se considera que por la altura del terreno y por ser zonas que registran gran incidencia de descargas electroatmosféricas, existe alta probabilidad de falla, protegiendo dichos puntos o postes en sus tres fases.

Considerando que existen 14 puntos críticos a proteger en sus 3 fases, se requieren 42 pararrayos en total, esquema con el cual se estima que de 4 salidas forzadas se salva una salida, resultando 3 indisponibilidades forzadas al año, con promedio de duración de 15 minutos cada una.

Independientemente del método que decida emplearse para el montaje de pararrayos, se mejora la actuación de la línea 230 kV Brillantes – La Esperanza, estando dicho procedimiento en función de la inversión inicial y de la disponibilidad para la adquisición y montaje de los pararrayos, así como de los beneficios o costos que se generen durante la vida útil de los pararrayos.

5. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL MONTAJE DE PARARRAYOS EN LA LÍNEA 230 KV BRILLANTES – LA ESPERANZA

El análisis económico del montaje de pararrayos en la línea 230 kV Brillantes – La Esperanza es indispensable para tomar en cuenta el monto de la inversión inicial que se necesita, pues con base en ella se tomarán decisiones para desarrollar el proyecto. Habrá que verificar que, aparte de la mejoría técnica en la actuación de la línea, se logren ahorros económicos que justifiquen aún más la implementación de pararrayos.

Es importante mencionar que cualquier esfuerzo que se realice para lograr reducir salidas forzadas por descargas electroatmosféricas en las instalaciones de transmisión es muy valioso, si se toma en cuenta que el sistema se torna más disponible y estable, con lo cual se garantiza la continuidad del fluido eléctrico, cuya importancia es invaluable para los servicios básicos, como hospitales, aviación, navegación, cuerpos de seguridad, sistemas de semaforización, iluminación, así como para los procesos industriales, comerciales, financieros y de servicios en general, todo lo cual se traduce en trabajo, progreso y desarrollo de los pueblos.

5.1. Consideraciones básicas

Es importante tomar en cuenta que todos los costos involucrados en la implementación de pararrayos en la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza forman parte de la inversión de la red de transporte del Sistema Nacional Interconectado, la cual se tiene que recuperar a la tasa de interés y vida útil establecida en la ley, para poder evaluar la recuperación de capital de las instalaciones de la red de transmisión.

Para el presente análisis, la evaluación económica está basada en una vida útil de los pararrayos igual a 30 años, con una tasa interés del 10% capitalizable anualmente, con lo cual se determinan las anualidades con que se recupera el monto invertido inicialmente.

5.2. Valor presente de la inversión en pararrayos y anualidad

Se considera que la implementación de pararrayos se puede realizar de acuerdo a los métodos propuestos y descritos en el capítulo anterior, tomando en cuenta que el montaje se lleva a cabo exclusivamente en los postes de configuración triangular que son de suspensión (postes tipo “S1” y “S2”).

Se estima que el costo por cada pararrayos ya instalado en el poste (incluido el costo del montaje) es de Q. 8,100.00. En la tabla XIV se muestran los costos para cada caso propuesto.

Tabla XIV. Costos totales para la implementación de pararrayos por cada método propuesto

Cantidad total de pararrayos por método propuesto	Costo total de los pararrayos (incluyendo el montaje)
363	Q. 2,940,300.00
111	Q. 899,100.00
46	Q. 372,600.00
42	Q. 340,200.00

Fuente: Elaboración del autor.

Conociendo el costo total para cada propuesta, se tiene el valor presente de la inversión (VP). El período “n” es de 30 años y la tasa de interés “i” es de 10% capitalizable anualmente. Se calcula la renta anual para cada una de las propuestas mediante la siguiente expresión:

$$A = VP * FIVP_{n-i}$$

en donde:

A = Renta anual

VP = Valor presente o inversión

FIVP_{n-i} = Factor de interés del valor presente en el período “n”

Las anualidades para cada método se muestran en la tabla XV, en la cual aparecen los montos correspondientes a cada inversión.

Tabla XV. Inversión y renta anual (A) para n = 30 años e interés del 10%.

Pararrayos empleados	Inversión o valor presente (VP)	Renta anual (A)
363	Q. 2,940,300.00	Q311,904.96
111	Q. 899,100.00	Q95,375.90
46	Q. 372,600.00	Q39,525.15
42	Q. 340,200.00	Q36,088.18

Fuente: Elaboración del autor.

5.3. Resultados

Desde el punto de vista económico, el costo o el ahorro que implica el montaje de pararrayos se encuentra tomando la renta anual calculada y restándole el beneficio obtenido por la implementación de los pararrayos calculados en el apéndice 1. En la tabla XVI se muestran los resultados respectivos.

Tabla XVI. Resultados para cada procedimiento propuesto

Pararrayos empleados	Renta anual (A)	Beneficios	A – Beneficios	Resultado
363	Q311,904.96	Q112,787.98	-Q199,116.99	Costo
111	Q 95,375.90	Q 79,746.27	-Q 15,629.63	Costo
46	Q 39,525.15	Q 39,996.57	+Q 471.42	Ahorro
42	Q 36,088.18	Q 4,524.96	-Q 31,573.22	Costo

Fuente: Elaboración del autor.

5.4. Análisis

Es interesante analizar los resultados que se encuentran en la tabla XVI. La propuesta que requiere la implementación de 363 pararrayos es la que técnicamente ofrece los mejores resultados, pero económicamente representa el mayor costo (Q. 199,116.99) cada año. De manera similar, las propuestas en las que se contempla instalar 111 y 42 pararrayos mejoran la actuación de la línea 230 kV Brillantes - La Esperanza, mas también representan costos al año por Q. 15,629.63 y Q. 31,573.22, respectivamente.

La propuesta que contempla la implementación de 46 pararrayos es la que representa un ahorro anual equivalente a Q. 471.42, instalando pararrayos en las 2 fases más bajas con relación al nivel del suelo, en 23 postes con valores de resistencia superior a 14Ω .

Más allá de que los procedimientos de implementación de pararrayos en cualquier línea de transmisión se justifiquen o no económicamente, es muy importante afirmar que no hay otro método que alcance los resultados técnicos y económicos para lograr una mejoría en la actuación contra las descargas electroatmosféricas.

CONCLUSIONES

1. Los altos niveles cerámicos, la vulnerabilidad del blindaje y los elevados valores de resistencias en la línea de transmisión 230 kV Brillantes - La Esperanza, justifican técnicamente la implementación de pararrayos de línea (sección 1.4. y 1.5.2.)
2. La inversión económica para la implementación de pararrayos en la línea Brillantes – La Esperanza se compensa si se comparan todos los beneficios que obtienen las comunidades de Huehuetenango y Quetzaltenango con la continuidad del transporte de potencia, principalmente porque se garantizan los servicios básicos, financieros, industriales y productivos.
3. El método que contempla la implementación de 46 pararrayos, instalando pararrayos en las 2 fases más bajas con relación al nivel del suelo, en 23 postes que presentan valores de resistencia superior a 14Ω , es el único que, según el análisis realizado, representa beneficio económico (sección 5.4.).
4. El desarrollo para determinar las especificaciones de los pararrayos llevado a cabo en el capítulo 3, es aplicable para cualquier línea de transmisión y nivel de voltaje.
5. Para definir las especificaciones de un pararrayos de línea es importante conocer la magnitud y duración de los sobrevoltajes temporales del sistema para poder evaluar la soportabilidad (sección 3.6.).

RECOMENDACIONES

1. Es necesario determinar los puntos críticos de una línea de transmisión en donde impactan los rayos, con lo cual se podrán definir los lugares apropiados para la instalación de los pararrayos.
2. El mantenimiento predictivo a través de termografía infrarroja aplicada a los pararrayos es muy importante para minimizar los riesgos de salidas forzadas por daños internos en los mismos, ya que las variaciones de temperatura no se pueden detectar por simple inspección.
3. La elección del sistema de fijación mecánica de los pararrayos a los postes y estructuras en general, debe ser el que garantice mayor seguridad, tomando en cuenta factores como el viento, el peso propio del pararrayos, la resistencia de rotura de los cables de conexión.
4. Se requiere que cada pararrayos, ante su eventual falla, posea un elemento de desconexión que aisle el pararrayos de la línea de transmisión, para garantizar la continuidad en el servicio.
5. Se debe verificar que los pararrayos estén diseñados para operar a la altura sobre el nivel del mar de los puntos en donde se instalen.
6. Es importante que para los niveles de tensión iguales o superiores a 230 kV, los pararrayos utilicen anillo equipotencial o corona, para distribuir de forma uniforme la intensidad del campo eléctrico en el extremo activo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Checa, Luis María. **Líneas de transporte de energía**. 3a. Edición. Zaragoza, España: Alfaomega Marcombo, 1988.
2. Dájus, Ary. **Transitorios eléctricos y coordinación de aislamiento. Aplicación en sistemas de potencia de Alta Tensión**. Brasil: EDUFF, 1987.
3. De la Rosa, F. **Evaluation of Surge Arresters Protection of electric Power Lines in Mexico**. Brasil: CIGRE, 1996.
4. Finck, Donald G. y Beaty Wayne. **Manual de Ingeniería Eléctrica**. 13a. Edición. Tomos I y II. México: Mc Graw-Hill, 1996.
5. Harper, G. E. **Técnicas computacionales en Ingeniería de Alta Tensión**. México: Limusa, 1987.
6. Harper, G. E. **Coordinación de aislamiento**. México: s.e., 1998.
7. **Pararrayos para aplicación en subestaciones y líneas de transmisión**. Brasil: s.e., 2,003.
8. Stevenson, William D. **Análisis de sistemas eléctricos de potencia**. 2da. edición. México: Mc Graw-Hill, 1988.

APÉNDICE

1. Ecuaciones y términos aplicables para el cálculo de costos por sanciones debido a salidas forzadas

Tanto las indisponibilidades forzadas como las indisponibilidades programadas de las líneas de transmisión, están sujetas a sanciones que originan costos para las empresas propietarias de la red de transporte, de acuerdo con las Normas técnicas de calidad del servicio de transporte y sanciones NTCSTS de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica de Guatemala CNEE.

Para el caso del análisis de la línea de transmisión 230 kV Brillantes - La Esperanza, los cálculos desarrollados en esta sección están basados en una estimación de ocurrencia igual a 4 salidas forzadas anuales de la línea, provocadas por descargas electroatmosféricas, con un tiempo de duración de la falla (o tiempo de reestablecimiento) de 15 minutos en promedio para cada salida.

1.1. Sanciones por indisponibilidad forzada

De acuerdo al artículo 48 de las NTCSTS, se aplica la expresión:

$$SNTIFLi = (NTIFLi - NTIF) * (DTIFLi / NTIFLi) * k * RTH/60 \text{ (Ecuación A)}$$

SNTIFLi:	Sanción por el número total de indisponibilidad forzada para la línea i
NTIFLi:	Número total de indisponibilidades forzadas para la línea i
NTIF:	Tolerancia al número total de indisponibilidades forzadas para cada línea
RHT:	Remuneración horaria del transportista, para la instalación que corresponda, según el artículo 132 del Reglamento de la Ley General de Electricidad
k:	Coefficiente según la categoría de la instalación

1.2. Sanción por desconexión automática

La sanción por desconexión automática la establece el artículo 49 de las NTCSTS de la siguiente forma:

$$SDAFLi = DAFLi * k * RTH / 60 \text{ (Ecuación B)}$$

SDAFLi:	Sanción por duración de indisponibilidad que obliga a la desconexión de generación y/o carga, para la línea i
DAFLi:	Duración, en minutos, de la indisponibilidad forzada que obliga a la desconexión de generación y/o carga, para la línea i

1.3. Sanción por reducción de la capacidad de transporte:

Esta sanción se aplica de acuerdo con el artículo 50 de las NTCSTS:

$$SRCT = DTRTC * (1 - CTD/CTM) * k * RTH / 60 \text{ (Ecuación C)}$$

SRCT :	Sanción por reducción a la capacidad de transporte
DTRCT:	Tiempo, en minutos, de duración total de la reducción a la capacidad de transporte
CTD:	Capacidad de transporte disponible
CTM:	Capacidad de transporte máxima

1.4. Costo de generación no vendida

La generación no vendida implica un costo, el cual se calcula multiplicando el costo de venta de un MWh por el total de MWh perdidos durante el período total de la indisponibilidad, como se indica:

$$CG = P * E \text{ (Ecuación D)}$$

CG:	Costo de generación no vendida
P:	Costo de venta de un MWh
E:	MWh perdidos durante el período de indisponibilidad de la línea

2. Cálculo de costos

El esquema de protección es de tal forma que cuando ocurren salidas forzadas de la línea 230 kV Brillantes – La Esperanza (NTIF = 2; k = 2 y RHT = \$94.29) y el voltaje en la barra de 69 kV de la subestación la Esperanza baja un 10% del valor nominal, automáticamente disparan las siguientes instalaciones eléctricas (todas con un NTIF = 3 y k = 0.5), indicándose también sus correspondientes tiempos de indisponibilidad por cada salida de la línea Brillantes – La Esperanza con un promedio de 15 minutos cada una.

- a) Línea 69 kV La Esperanza – Pologuá, 30 minutos (RHT = \$21.53)
- b) Transformador 69/13.6 kV, 5/7 MVA, S/E Pologuá, 35 minutos (RHT = \$6.61)
- c) Línea 69 kV Pologuá – Huehuetenango, 35 minutos (RHT = \$37.81)
- d) Transformador 69/13.8 kV, 20/28 MVA, S/E Huehuetenango, 40 minutos (RHT = \$23.54)
- e) Transformador 69/34.5 kV, 10/14 MVA, S/E Huehuetenango, 40 minutos (RHT = \$15.88)
- f) Línea 69 kV Huehuetenango – Ixtahuacán, 40 minutos (RHT = \$37.01)
- g) Transformador 69/34.5 kV, 2.5 MVA, S/E Ixtahuacán, 45 minutos (RHT = \$3.125)
- h) Línea 69 kV Huehuetenango – San Juan Ixcoy, 40 minutos (RHT = \$42.66)
- i) Transformador 69/34.5, 2.5 MVA, S/E San Juan Ixcoy, 45 minutos (RHT = \$16.88)

Con los anteriores datos y aplicando las ecuaciones correspondientes, se encuentran los costos totales que aparecen en la tabla XVII, tomando en cuenta una potencia promedio de 75 MW no vendida.

Tabla XVII. Costos totales por indisponibilidades y generación no vendida

No. de salidas	Costo por sanciones	Costo para generar 1 MWh	Tiempo promedio indisponible	Costo por generación no vendida	Costos Totales
4	Q 9,587.98	\$ 86.00	2.00 horas	Q 103,200.00	Q 112,787.98
3	Q 6,685.52	\$ 86.00	1.75 horas	Q 101,587.50	Q 108,273.02
2	Q 4,163.41	\$ 86.00	1.33 horas	Q 68,628.00	Q 72,791.41
1	Q 2,081.71	\$ 86.00	0.66 horas	Q 30,960.00	Q 33,041.71
0	Q 00.00	\$ 86.00	0.00 horas	Q 00.00	Q 00.00

Fuente: Elaboración del autor.

3. Cálculo de beneficios con la implementación de pararrayos

Los beneficios obtenidos mediante la implementación de pararrayos se encuentran tomando el costo total fijo (que se eroga por las 4 salidas forzadas por año que se estiman en la línea Brillantes – La Esperanza) y restándole el costo por las salidas que se proyecta ocurran al aplicar un método de protección propuesto; los resultados aparecen en la tabla XVIII.

Tabla XVIII. Resumen de beneficios que se obtienen con el montaje de pararrayos

No. de pararrayos	No. de salidas estimadas	Costos fijos sin emplear pararrayos	Costos totales empleando pararrayos	Beneficio anual (costo no pagado)
363	0	Q 112,787.98	Q 00.00	Q 112,787.98
111	1	Q 112,787.98	Q 33,041.71	Q 79,746.27
46	2	Q 112,787.98	Q 72,791.41	Q 39,996.57
42	3	Q 112,787.98	Q 108,273.02	Q 4,524.96
0	4	Q 112,787.98	Q 112,787.98	Q 00.00

Fuente: Elaboración del autor.