

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA
MECÁNICA**



**PROTECCION DE LA LINEA DE TRANSMISION 2254-220
Kv CERRO DE PASCO – HUANUCO CONTRA
DESCARGAS ATMOSFERICAS INSTALANDO
PARARRAYOS DE LINEA**

**INFORME
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

TEODOLINDO ROMERO QUICHIZ

PROMOCIÓN 2010-II

**LIMA–PERÚ
2014**

DEDICATORIA :

*DEDICO A MI AMADA ESPOSA HELLEN
M. VILLALVA CHAVEZ POR SU VALIOSO
APOYO EN TODO MOMENTO Y A MI
QUEIRIDA HIJA CAMILA BELEN
ROMERO VILLALVA POR SU
COMPRESION Y AMOR.*

AGRADECIMIENTO

*AGRADECIMIENTO A MI ALMA MATER
UNIVERSIDAD NACIONAL DE
INGENIERIA FACULTAD DE
INGENIERIA MECANICA Y A LOS
DOCENTES QUE ME AYUDARON A MI
FORMACION PROFESIONAL Y
PERSONAL DURANTE MI ESTADIA EN
DICHA INSTITUCION.*

ÍNDICE

DEDICATORIA :	II
AGRADECIMIENTO	III
ÍNDICE	IV
PROLOGO	1
CAPITULO I_INTRODUCCION	3
1.1. Objetivo general.....	4
1.2. Los objetivos específicos son:	4
CAPITULO II_ASPECTOS GENERALES	5
2.1. Antecedentes	5
2.2. Ubicación de la línea 2254	6
CAPITULO III_ANALISIS DEL AISLAMIENTO DE DISEÑO DE LA LÍNEA 2254- 220 KV CERRO DE PASCO-HUANUCO	7
3.1. Importancia de la línea 2254–220 kV Cerro de Pasco–Huánuco	7
3.2. Descripción de la línea de transmisión	7
3.3. Verificación del aislamiento de diseño	8
3.3.1. Voltaje de flameo en seco	10
3.3.2. Distancia de fuga.....	10
3.3.3. Nivel básico de aislamiento BIL	12
3.4. Verificación de la red de puesta a tierra	15
3.4.1. Voltaje de flameo en seco	15
3.4.2. Corriente de rayo que produce flameo inverso	16
3.5. Métodos para mejorar la actuación de una línea de transmisión	16
3.5.1. Distancia de aislamiento	17
3.5.2. Blindaje	18
3.5.3. Sistema de tierras	18
3.5.3.1. Electrodo de tierra	19

3.5.3.2. Contrantenas	19
3.5.4. Implementación de pararrayos	20
CAPITULO IV_FACTORES QUE INTERVIENEN EN LAS SALIDAS FORZADAS DE LA LÍNEA 2254-220 KV CERRO DE PASCO-HUANUCO	21
4.1. Registro de aperturas en la línea 2254-220kV Cerro de Pasco-Huánuco	21
4.2. Niveles cerámicos	21
4.2.1. Concepto de nivel cerámico	22
4.2.2. Concepto de densidad de rayos a tierra.....	22
4.3. Efectos en el aislamiento debido a la altitud de operación de la línea	26
4.4. Influencia de los agentes contaminantes en el aislamiento de la línea.....	26
CAPITULO V_ESPECIFICACIÓN TÉCNICA Y SELECCIÓN DE LOS PARARRAYOS PARA LA LÍNEA 2254-220 KV CERRO DE PASCO-HUANUCO	28
5.1. Naturaleza de los sobrevoltajes.....	28
5.2. Sobrevoltajes temporales	29
5.3. Sobrevoltajes transitorios	31
5.3.1. Sobrevoltajes transitorios de frente lenta	31
5.3.2. Sobrevoltajes transitorios de frente rápida.....	32
5.3.3. Sobrevoltajes transitorios de frente muy rápida.....	33
5.3.4. Sobrevoltajes transitorios combinados.....	33
5.4. Descargas atmosféricas en líneas de transmisión	34
5.5. Pararrayos	35
5.5.1. Pararrayos de carburo de silicio (SiC)	36
5.5.2. Pararrayos de óxido de cinc (ZnO) sin centelladores.....	36
5.6. Principio de funcionamiento de los pararrayos de línea	39
5.7. Criterios para la selección de pararrayos poliméricos de línea.....	41
5.8. Especificaciones técnicas y selección del pararrayos para la línea 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco.....	42

CAPITULO VI_MÉTODOS PARA LA INSTALACIÓN DE PARARRAYOS EN LA LÍNEA 2254-220 KV CERRO DE PASCO-HUÁNUCO.....	52
6.1. Instalación de pararrayos en estructuras ubicadas en regiones con suelos de elevada resistividad	53
6.2. Instalación de pararrayos en estructuras ubicadas en regiones montañosas	53
6.3. Configuración triangular	54
6.4. Instalación de pararrayos en líneas existentes con cables de guarda	54
6.4.1. Implementación de pararrayos en torres previamente definidos.....	55
CAPITULO VII_ANALÍISIS ECONÓMICO DEL MONTAJE DE PARARRAYOS EN LA LÍNEA 2254-220 KV CERRO DE PASCO-HUANUCO.....	57
7.1. Consideraciones básicas.....	58
7.2. Costo Total.....	59
7.3. Beneficio Costo	60
CONCLUSIONES	61
RECOMENDACIONES	62
BIBLIOGRAFÍA	63
ANEXOS	64

PROLOGO

El presente informe presenta la instalación de pararrayos de línea (TLA) para la protección de la línea de transmisión 2254 - 220 kV Cerro de Pasco-Huánuco contra descargas atmosféricas.

Las descargas atmosféricas son la principal causa de falla en las líneas de transmisión, por lo que es necesaria una efectiva coordinación del aislamiento en su diseño. Para entender mejor el tema del informe se ha visto conveniente dividirlo en siete capítulos los cuales son:

Primer Capítulo; que es la introducción se detalla el objetivo de mi trabajo y sus alcances.

Segundo capítulo; los antecedentes y ubicación de este trabajo.

Tercer capítulo; análisis del aislamiento de diseño de la línea 2254- 220 kv Cerro de Pasco-Huánuco, en este capítulo describimos la importancia de la línea en estudio, así como la verificación del aislamiento de diseño y de la red de puesta a tierra, estudiando también los diferentes métodos para mejorar la actuación de la línea de transmisión.

Cuarto capítulo; Factores que intervienen en las salidas forzadas de la línea 2254-220kV Cerro de Pasco-Huánuco, se analizan los registros de aperturas en la línea 2254 así como los factores que intervienen como niveles ceraunicos (cantidad de rayos que inciden en la zona), densidad de rayos, efectos debido a la altura y la contaminación en el aislamiento de la línea.

Quinto capítulo; Especificación técnica y selección de los pararrayos para la línea 2254-220kV Cerro de Pasco-Huánuco, en este capítulo se hace un estudio de los diferentes sobrevoltajes en la línea debido a descargas atmosféricas teniendo presente que el dispositivo que hace las descargas a tierra es el pararrayo, su principio de funcionamiento, clases, criterios de selección y las especificaciones técnicas.

Sexto capítulo; Consideraciones para la instalación de pararrayos en la línea 2254-220 kV. Cerro de Pasco-Huánuco, se analizan los diferentes métodos para la instalación de los pararrayos en la estructura.

Séptimo capítulo; Análisis económico de la instalación de pararrayos en la línea 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco, se realiza el análisis económico beneficio/costo tomando como ejemplo el año 2002 al 2005.

CAPITULO I

INTRODUCCION

La incidencia directa de las descargas atmosféricas 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 atmosféricas en el cable de guarda. Así pueden originarse sobre voltajes 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.

La línea 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco, en más de una oportunidad, ha colapsado, debido a fallas en líneas de transmisión originadas por descargas atmosféricas contra las cuales no están protegidas lo suficiente.

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 atmosféricas.

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 los pararrayos en las fases a proteger origina aumento de la eficiencia del sistema de transporte de energía y 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 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco es indispensable, ya que es muy importante, para el transporte de la potencia eléctrica a la mina Antamina, por lo que se requiere que siempre esté disponible.

El análisis económico demuestra que con una estrategia de instalación de pararrayos en la línea 2254-220kV Cerro de Pasco-Huánuco, es posible obtener ahorros económicos para la empresa propietaria de la red de transporte, así como para la mina Antamina adicionando a los beneficios técnicos que siempre se alcanzan.

1.1. Objetivo general

El objetivo general es de proteger la línea de transmisión 2254-220kV Cerro de Pasco-Huánuco contra descargas atmosféricas instalando pararrayos de línea, así como la especificación técnica y económica de los pararrayos a instalar en dicha línea.

1.2. Los objetivos específicos son:

- a) Analizar los sobre voltajes que se presentan en los sistemas eléctricos de potencia
- b) Estudiar los efectos que representan las descargas atmosféricas en las líneas de transmisión
- c) Analizar la operación de los pararrayos
- d) Instalar pararrayos de línea en la línea 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco
- e) Evaluar si se justifica económicamente la instalación pararrayos de línea 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco.

CAPITULO II

ASPECTOS GENERALES

2.1. Antecedentes

Las salidas forzadas en las 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.

La línea L-2254 forma parte de anillo Vizcarra la cual convergen conjuntamente con la L-2255 la cual, alimenta a la Compañía Minera Antamina que energiza 04 molinos necesarios para su proceso de producción estos molino tiene como configuración de disparo una actuación en 20ms ante una variación de tensión de 15% en cualquiera de las fases.

Durante los años 2002 a 2007 se han identificado las zonas donde se han producido las descargas atmosféricas siendo identificados con ayuda de los registradores de fallas de los relés de distancias y con el apoyo del personal de líneas se logró ubicar físicamente los lugares y las torres donde se produjeron las descargas atmosféricas para así lograr establecer zonas de niveles isoceramicos altos o de mayor incidencia.

2.2. Ubicación de la línea 2254

La línea 2254-220 kV, está ubicado entre Cerro de Pasco y Huánuco entra en operación el año 2,002 se convierte en la línea que interconecta la región Sur, uniendo la subestación Paragsha II, en el departamento de Cerro de Pasco, con la subestación Vizcarra, en el departamento de Huánuco.

La línea tiene una longitud de 123.9 kilómetros, y su altura en metros sobre el nivel de mar (m.s.n.m.) va desde 3260 m.s.n.m. en la subestación Vizcarra, llegando a alcanzar una altura de hasta 4570 m.s.n.m. en la subestación de Paragsha II.

CAPITULO III

ANÁLISIS DEL AISLAMIENTO DE DISEÑO DE LA LÍNEA 2254- 220 KV CERRO DE PASCO-HUANUCO

La línea de transmisión 2254–220 kV Cerro de Pasco–Huánuco entra en operación el año 2,002 con lo cual se convierte en la línea que interconecta la región Sur, uniendo la subestación Paragsha II, en el departamento de Cerro de Pasco, con la subestación Vizcarra, en el departamento de Huánuco.

3.1. Importancia de la línea 2254–220 kV Cerro de Pasco–Huánuco

La red de transporte de energía eléctrica 2254–220 kV Cerro de Pasco–Huánuco es importante para la Mina Antamina ya que forma parte de la subestación Vizcarra la cual alimenta a la línea de transmisión 2255-220 kV que energiza la mina, el sistema de transmisión de esa región 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 si es que protegemos la línea 2254.

3.2. Descripción de la línea de transmisión

La línea está compuesta por un solo circuito; montada en torres A°G° en celosía, cuyas alturas son de 27, 29, 30 y 32 metros; cuyas características generales de LT Paragsha II- Vizcarra es:

Tabla 3.1 Datos de la línea de transmisión

CODIGO	1.-2254
TENSION NOMINAL	220 kV
EMPRESA PROPIETARIA	ISA-PERU
NUMERO DE TERNAS	UNA (1)
LONGITUD TOTAL	123.9 Km
TIPO DE ESTRUCTURAS	TORRES A°G° EN CELOSIA
CONDUCTOR	1 X ACSR FINCH 635,5 mm ² /FASE
CABLE DE GUARDA	2 X EHS 50mm ²
DISPOSICION DE LOS CONDUCTORES	TRIANGULAR
AÑO DE PUESTA EN SERVICIO	2002
POTENCIA DE DISEÑO REFERENCIAL	150 MVA
AISLADORES	POLIMERICO TIPO COMPOSITE
NUMEROS DE ESTRUCTURAS	287
NEMERO DE VERTICES	32

Fuente: COES

3.3. Verificación del aislamiento de diseño

Como ya se indicó, todo el aislamiento utilizado en la línea de transmisión 220 kV 2254–220 kV Cerro de Pasco–Huánuco es polimérico. Las características eléctricas se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 3.2 Datos del aislador

DESCRIPCION	UNIDAD	VALOR
FABRICANTE		LAPP
MODELO		01K9821
TIPO		COMPOSITE
NORMA		IEC-1109
MATERIAL		
NUCLEO		FIBRA DE VIDRIO
RECUBRIMIENTO		JEBE DE SILICONA
CAMPANAS		JEBE DE SILICONA
CONEXIONES		OJO – BOLA ANSI 52 -8
LONGITUD TOTAL	mm	3100
LONGITUD DE ARCO SECO	mm	2775
LINEA DE FUGA	mm	6000
CARGA MECANICA GARANTIZADA	kN	160
TENSION DISRUPTIVA DE PRUEBA		
A FRECUENCIA INDUSTRIAL		
SECO	Kv	690
HUMEDO(BAJO LLUVIA)	Kv	640
IMPULSO		
POSITIVO	kV	1595
NEGATIVO	kV	1680
PESO	Kg	11.4

Fuente: COES

3.3.1. Voltaje de flameo en seco

Las líneas deben cumplir los requisitos del CNE- Suministro 2001 para:

Línea en 220 kV

- Voltaje de operación nominal 220 kV
- Voltaje máximo de operación 245 kV
- Voltaje de sostenimiento de maniobra 750 kV
- Voltaje de sostenimiento al impulso atmosférico 1050 kV

El nivel de tensión de flameo en seco de, de acuerdo con la un aislador o una cadena de aisladores no debe ser inferior a 450 kV para voltajes de 220 kV entre fases norma ANSI C29.1-1988, expresando también que en zonas en donde las descargas atmosféricas 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.

Por lo tanto, se puede concluir que los aisladores empleados en la línea 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco cumplen con el voltaje mínimo de flameo en seco, ya que el aislador tipo suspensión 690 kV, que son superiores a los 450 kV que indica la norma.

3.3.2. 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

plaguicidas, 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 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco, tomando en cuenta que la trayectoria predominante es por área rural, agrícola y montañosa, con excepción de algunas poblaciones.

Tabla 3.3 Nivel de contaminación y líneas de fuga para aislamientos exteriores

NIVEL DE CONTAMINACION	AREAS	LINEA DE FUGA MINIMA "K" (DE FASE A TIERRA) EN mm/Kv CON RESPECTO AL VOLTAJE FASE A FASE MAXIMO DEL SISTEMA
LIGERA	SIN INDUSTRIA, RURAL O BAJA DENSIDAD DE VIVIENDA, FRECUENTES VIENTOS Y LLUVIA, AGRICOLAS, MONTAÑOSAS	16.0
MEDIA	INDUSTRIALES NO PRODUCTORAS DE HUMOS CONTAMINANTES, EXPUESTAS A VIENTOS MARINOS ALEJADAS DEL MAR	20.0
ALTA	ALTA DENSIDAD DE INDUSTRIA, PROXIMAS AL MAR EXPUESTAS A FUERTES VIENTOS MARINOS	25.0
MUY ALTA	EXTENSAS CON MUCHO POLVO, INDUSTRIAS PRODUCTORAS DE HUMO Y PARTICULAS PESADAS EN SUSPENSION	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 220 kV Cerro de Pasco-Huánuco. La distancia de fuga de los aisladores poliméricos empleados es: 6,000 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 del CNE - 2001, para un sistema nominal de 220 kV el voltaje máximo es de $V_{max} = 245$ kV.

Con los valores conocidos se tiene que para el aislador tipo suspensión la línea de fuga es: $k = 24.48$ mm/kV, con lo cual el asilamiento empleado tiene distancias de fuga adecuadas para la operación de la línea, tomando en cuenta lo indicado en la tabla I 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.

3.3.3. Nivel básico de aislamiento BIL

El voltaje que produce la descarga disruptiva (voltaje crítico de flameo V_{CI}) 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) según la norma IEC es: $BIL = VCF * (1 - 1.3\sigma)$, en donde σ es la desviación estándar referida al valor del VCF, según la Especificación de la Comisión Federal de Electricidad (CFE L 0000-06) 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 de diseño de la línea 2254 - 220 kV Cerro de Pasco - Huánuco es: $D = 3.50$ m, por lo que el voltaje crítico de flameo es: $VCF = 1,925$ kV y el nivel básico de aislamiento es: $BIL = 1,850$ kV.

Para un nivel de voltaje nominal de 220 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 II.

Tabla 3.4 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 ”
1000	1.00	2700	0.83
1200	0.98	3000	0.80
1500	0.95	3600	0.75
1800	0,92	4200	0.70
2100	0.89	4800	0.65
2400	0.86	5400	0.61

La máxima altura que alcanza la línea de transmisión 2254 - 220 kV Cerro de Pasco – Huánuco 4,570 m.s.n.m., altura para la cual el factor de corrección del BIL, después de interpolar los valores de la tabla IV, es: $\delta = 0.67$. Aplicando el factor de corrección $\delta = 0.67$, al BIL de 1,050 kV (a 1,000 m.s.n.m.) para encontrar el BIL equivalente a una altura de 4.570 m.s.n.m. (que es la altura máxima que alcanza la línea de transmisión 2254 - 220 kV Cerro de Pasco – Huánuco), se tiene que: $\text{BIL (4,570 m.s.n.m.)} = 1,567$ kV.

Con los resultados obtenidos, se verifica que el BIL de 1,850 kV del asilamiento polimérico empleado en la línea de transmisión 2254 - 220 kV Cerro de Pasco – Huánuco está dimensionado para operar a una altitud de 4,570 m.s.n.m., ya que para esta altura se necesita un BIL de 1,567 kV (tomando como referencia el BIL máximo normalizado de 1,050 kV para un voltaje nominal de 220 kV).

3.4. Verificación de la red de puesta a tierra

Las líneas de transmisión que son alcanzadas por las descargas atmosféricas 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).

3.4.1. Voltaje de flameo en seco

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 atmosférica: voltaje en la parte superior, o punta de la estructura, y voltaje de flameo inverso, en los aisladores de la línea.

3.4.2. Corriente de rayo que produce flameo inverso

Tabla 3.4 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	CORRIENTE DE RAYO I(i) QUE PRODUCE FLAMEO INVERSO EN KA
30	48
25	55
20	67
15	86
10	124
7	173
5	238

Fuente: Antamina

Con los resultados indicados en la tabla III, 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.

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

En líneas de transmisión con voltaje nominal de hasta 220 kV, las descargas atmosféricas 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 descargas atmosféricas de las regiones por donde atraviesa la línea. Existen diferentes métodos para minimizar o tender a cero las salidas de líneas de transmisión no programadas debidas a descargas atmosféricas, los cuales pueden ser aplicados individualmente o combinados.

3.5.1. Distancia de aislamiento

Para la línea de transmisión 2254–220 kV Cerro de Pasco–Huánuco, 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.

3.5.2. 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 2254–220 kV Cerro de Pasco–Huánuco, 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 atmosféricas.

3.5.3. 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.

3.5.3.1. 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.

3.5.3.2. 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 2254–220 kV Cerro de Pasco–Huánuco 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.

3.5.4. 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 atmosféricas, 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 2254–220 kV Cerro de Pasco–Huánuco contra las descargas atmosféricas.

CAPITULO IV

FACTORES QUE INTERVIENEN EN LAS SALIDAS FORZADAS DE LA

LÍNEA 2254-220 KV CERRO DE PASCO-HUANUCO

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 en nuestro caso la minería Antamina.

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 atmosféricas 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.

4.1. Registro de aperturas en la línea 2254-220kV Cerro de Pasco-Huánuco

4.2. Niveles cerámicos

La determinación de los efectos que provocan las descargas atmosféricas 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 atmosférica por regiones y se aplican diferencias en los criterios para el diseño.

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

4.2.1. 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.

4.2.2. Concepto de densidad de rayos a tierra

La densidad de rayos a tierra es una forma de medir el número de descargas atmosféricas 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 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco es en parte por región de la sierra-selva los niveles cerámicos de los lugares por donde atraviesa, de acuerdo a la actualización más reciente del mapa cerámico del Perú: 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 4.1 Niveles ceráunicos para la línea 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco y sus correspondientes densidades de rayos a tierra.

Nc (días con tormenta al año)	Ng (número de rayos a tierra por km ²)
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 II, es importante señalar que los valores de nivel ceráunico disminuyen gradualmente de la subestación Vizcarra, a la subestación Paragsha II; de igual forma sucede con el número de rayos a tierra, por lo cual se puede afirmar que para la línea 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco es más probable que las descargas atmosféricas originan salidas de línea en las regiones donde las altitudes en m.s.n.m. son menores debido a un mayor nivel ceráunico.

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 ceráunico de las líneas, de acuerdo a la expresión: $NRL = 0.04 * Nc^{1.25} (0.0133(h_T + 2 * h_g))$, 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 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco $h_c = 18.5$ m y $h_g = 29.5$ m. Para efectos de análisis, es importante tomar en cuenta que los niveles ceráunicos cambian en el trayecto de la línea 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco, teniendo asociado cada nivel ceráunico. En la tabla II se muestran los resultados.

Tabla 4.2 Nivel ceráunico de la línea 2254-220 kV Ancash-Huánuco, densidad de rayos, número de rayos a la línea/100 Km-año es:

Nc	Ng	NRI
50	5.32	5.47
60	6.68	6.88
80	9.57	9.85
100	12.65	13.02

Fuente: Elaboración del autor.

Calculando un promedio de los diferentes niveles ceráunicos por donde atraviesa la línea 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco y evaluando dicho nivel ceráunico para encontrar las descargas a la línea en su longitud completa (123.9 km), tenemos que:

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

$$NRI \text{ promedio} = 8.80 \text{ rayos a la línea} / 100 \text{ km-año}$$

$$\text{Rayos a la línea} / \text{año} = 8.80 * 123.9 / 100 = 10.90 \approx 11 \text{ rayos a la línea} / \text{año}$$

4.3. 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 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco, ya que conforme atraviesa la región de la sierra, su nivel cerámico va decreciendo de acuerdo al mapa cerámico de Perú.

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.

De acuerdo a los cálculos realizados en el capítulo I, se espera que las fallas por flameo a tierra en la línea 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco 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.

4.4. 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 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco, 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 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco. 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.

CAPITULO V

ESPECIFICACIÓN TÉCNICA Y SELECCIÓN DE LOS PARARRAYOS PARA LA LÍNEA 2254-220 KV CERRO DE PASCO-HUÁNUCO

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 atmosféricas, 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 atmosféricas.

5.1. 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 220 kV y voltaje máximo de 245 kV, cualquier valor arriba de $\sqrt{2} \cdot 245 / \sqrt{3}$ kV (fase a tierra) ó $\sqrt{2} \cdot 245$ kV (fase a fase) se considera sobrevoltaje.

5.2. 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 (ferrorresonancias) 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: $TOV_{\text{del sistema}} = K * V_{\text{max}}/\sqrt{3}$, en la cual $TOV_{\text{del sistema}}$ 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 5.1 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.

5.3. 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, rápida y muy rápida).

5.3.1. 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) $T_2 \leq 20$ ms.

Estos sobrevoltajes se pueden originar por fallas, maniobras de operación o por descargas atmosféricas directas en los conductores de fase de las líneas de transmisión.

En el caso de descargas atmosféricas 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 μs y tiempo hasta el medio valor de 2,500 μs .

5.3.2. 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 atmosféricas 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 μs y tiempo hasta el medio valor de 50 μs . 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.

5.3.3. 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.

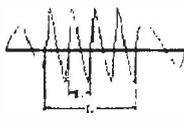
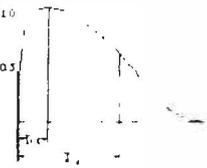
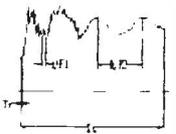
5.3.4. Sobrevoltajes transitorios combinados

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.

5.4. Descargas atmosféricas en líneas de transmisión

Las descargas atmosféricas son la principal causa de salidas forzadas en las líneas de transmisión 2254-220 kV. Estos índices pueden ser más críticos en regiones con altos niveles cerámicos y elevados valores de resistencia al suelo.

Figura 5.1 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	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ segundos}$	$T_{cr} = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \mu\text{s}$	$T_1 = 1.2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	No especificado

Fuente: Normas IEC.

En general, una descarga atmosférica 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 atmosférica 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.

5.5. 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 aislamiento 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.

5.5.1. 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.

5.5.2. 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 zinc 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 atmosféricas 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.

5.6. Principio de funcionamiento de los pararrayos de línea

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 atmosférica 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 zinc (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 atmosféricas.

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 atmosféricas 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.

5.7. 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 descargas atmosféricas, 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.

5.8. Especificaciones técnicas y selección del pararrayos para la línea 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco

Para la selección del pararrayos a implementar en la línea 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco, 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: 220 kV (fase a fase)
- Voltaje máximo del sistema: 245 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: $VCFO = 1,510 \text{ kV}$
- Sobrevoltaje temporal de frecuencia fundamental del sistema: $TOV = 380 \text{ kV}$
- Duración del sobrevoltaje temporal de frecuencia fundamental: 4 segundos.

- a) Se define el MCOV del pararrayos: $MCOV \geq 245/\sqrt{3} \geq 141.45 \text{ kV}$
- 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 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco, debido a la confiabilidad y disponibilidad que debe presentar para la estabilidad del sistema de esa región, es estratégica.
 - El nivel de aislamiento de la línea: las líneas que se encuentran deficientemente aterradas elevan las corrientes de descargas por descargas atmosféricas. La línea 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco, por presentar terrenos de alta resistividad, queda expuesta a dichas elevaciones de corriente.
 - La probabilidad de ocurrencia de las descargas atmosféricas de amplitud elevada: zonas de alta densidad de descarga a tierra tienen probabilidad de elevadas corrientes de descarga.
 - Desempeño de la línea y condiciones ambientales: las corrientes de descargas atmosféricas 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 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco, que emplea cable de guarda (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: $MCOV \geq 141.45$ kV e $I_{ND} = 10$ kA. Para efecto de análisis de la línea 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco, elegimos dos pararrayos con las especificaciones que se muestran en la tabla IV.

Tabla 5.2 Características eléctricas de pararrayos

VOLTAJE NOMINAL VN (KV)	MCOV (kV)	V _R IMPULSO EMPINADO 10 KA MÁXIMO 0.5 M S (KV)	V _r impulso de maniobra 500 A max(kV)	V _r impulso atmosférico 10 kA 8/20 μs (kV)	Distancia de fuga (mm)
180	144	511	359	470	8,000
192	154	591	399	512	8,000

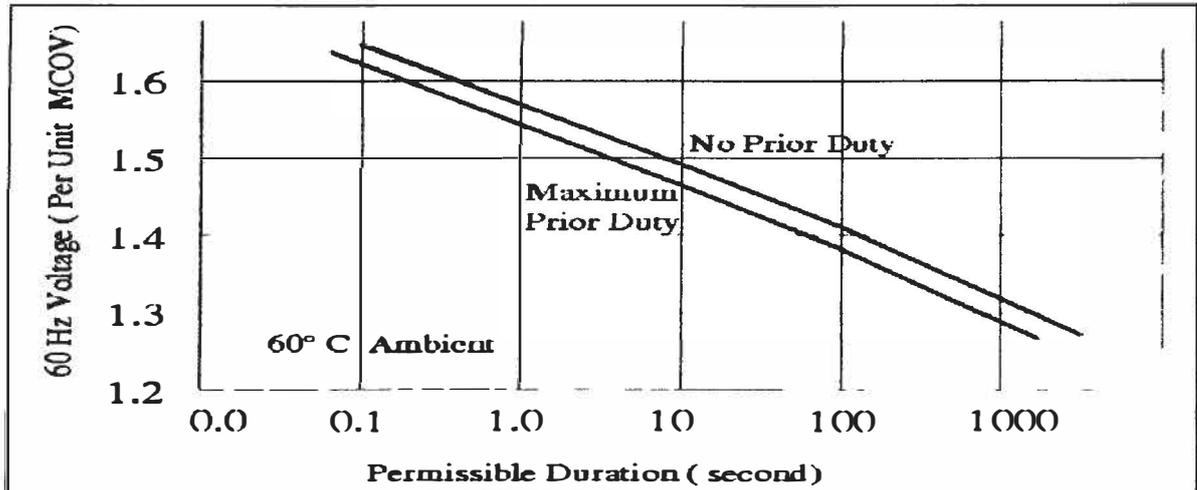
Fuente: Catálogo Tyco Electronics de pararrayos para línea.

- 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 144 kV y 154 kV se tiene que: $TOV_{\text{sistema}}/V_{N\text{pararrayos}} \geq (380/\sqrt{3})/144 = 1.52$ y $TOV_{\text{sistema}}/V_{N\text{pararrayos}} \geq (380/\sqrt{3})/154 = 1.42$, respectivamente.

Localizando el punto de operación de los pararrayos en la figura 4, 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 1.52 y 1.42 ($TOV_{\text{sistema}} / MCOV_{\text{pararrayos}}$) 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 ($TOV = 380 \text{ kV}$) con duración de 4 segundos.

Figura 5.2 Sobretensión de frecuencia fundamental versus tiempo



Fuente: Catálogo Tyco electronics de pararrayos para línea.

- e) Seguidamente, se procede al cálculo de la corriente que circula por el pararrayos, por medio de la expresión: $I = (2.4 \cdot VCFO - V_r) / Z_0$, en donde $VCFO = 1,680$ kV; para el pararrayos con V_r de 470 kV la corriente es de 8.91 kA, y para el pararrayos con V_r de 512 kV la corriente es de 8.80 kA.

Con los anteriores resultados se puede concluir que los pararrayos analizados con corriente nominal de descarga $IND = 10$ 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: $E_{\text{pararrayos}} = (2 \cdot V_{\text{CFO}} - V_r(1 + \ln(2 \cdot V_{\text{CFO}} / V_r))) \cdot V_r \cdot T_d / Z_o$, en la cual V_{CFO} es el voltaje disruptivo crítico de polaridad negativa del aislamiento (1,680 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 atmosférica, 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 470 kV la $E_{\text{pararrayos}} = 692.85$ kJ y para el pararrayos con V_r de 512 kV la $E_{\text{pararrayos}} = 723.74$ kJ, la capacidad de absorción de energía de un pararrayos está dada como: $E_{\text{pararrayos}}/V_N$, por lo que para el pararrayos con V_r de 470 kV la capacidad de absorción de energía es 3.85 kJ/kV y para el pararrayos con V_r de 512 kV la capacidad de absorción de energía es 3.77 kJ/kV.

De acuerdo con la norma IEC60099-4, 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 220 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 2254-220 kV Ancash-Huánuco, se tiene que para el pararrayos con $V_N = 180$ kV se necesita una capacidad mínima de absorción de energía de 7.7 kJ/kV, y para el pararrayos con $V_N = 192$ kV se necesita una capacidad mínima de absorción de energía de 7.54 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 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco.

- 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 1,546.4 MVA en la línea 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco, la corriente de cortocircuito es aproximadamente: $I_{cc} = 4,058$ A.

- h) El efecto de la contaminación debe ser considerado en los pararrayos, dimensionados 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 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco tiene distancias de fuga para el tipo suspensión 6,000 mm. El pararrayos con V_N de 180 kV tiene distancia de fuga igual a 8,000 mm y el pararrayos con V_N de 192 kV tiene distancia de fuga de 8,000 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 2254-220 kV Ancash-Huánuco, el BIL del aislamiento es 1,567 kV; por lo tanto, para el pararrayos con V_r de 470 kV el nivel de protección es 70% y para el pararrayos con V_r de 512 kV el nivel de protección es de 67.3%. 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.

Las especificaciones del pararrayos seleccionado aparecen en la tabla VIII, con la observación de que cualquiera de los dos pararrayos analizados tienen la capacidad para operar con las solicitudes de la línea 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco.

Tabla 5.3 Características eléctricas para solicitar el pararrayos de la línea 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco

Voltaje nominal V_N :	180 kV
MCOV:	144 kV
Corriente nominal de descarga I_{ND} :	10 kA
Clase 2 (capacidad de absorción de energía mínima):	4.5 kJ/kV
Corriente de falla del sistema (I_{cc}):	4,058 A
Voltaje residual (V_r) para impulso empinado 10 kA máximo 0.5 μ S	511 kV
Voltaje residual (V_r) para impulso de maniobra 500 A máximo	359 kV
Voltaje residual (V_r) para impulso atmosférico 10 kA 8/20 μ S	470 kV
Distancia de fuga superior a:	8000 mm
Altura máxima de operación:	4,570 m.s.n.m.

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.

CAPITULO VI

MÉTODOS PARA LA INSTALACIÓN DE PARARRAYOS EN LA LÍNEA 2254- 220 KV CERRO DE PASCO-HUÁNUCO.

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 atmosféricas, 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 acompañado 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 atmosféricas.

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.

6.1. 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 atmosféricas a lo largo de todas las estructuras de dicha región.

6.2. 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 atmosféricas, 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.

6.3. Configuración triangular

Cuando el conductor superior ofrece un blindaje efectivo con relación a los otros dos conductores, el procedimiento a emplear es colocar un pararrayo en la parte inferior.

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

6.4. Instalación de pararrayos en líneas existentes con 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.

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 atmosférica 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).

Con base en todo lo expuesto en las secciones anteriores y en virtud de que la configuración de la línea 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco es predominantemente triangular 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 torres donde se instalarán.

6.4.1. Implementación de pararrayos en torres previamente definidos.

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 torre.

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 torre.

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 atmosféricas, existe alta probabilidad de

falla, protegiendo dichos puntos o torres en sus tres fases.

Independientemente del método que decida emplearse para el montaje de pararrayos, se mejora la actuación de la línea 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco, 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.

CAPITULO VII

ANÁLISIS ECONÓMICO DEL MONTAJE DE PARARRAYOS EN LA LÍNEA 2254-220 KV CERRO DE PASCO-HUANUCO.

El análisis económico del montaje de pararrayos en la línea 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco 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 atmosféricas 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, bomberos, sistemas de semaforización, iluminación, así como para los procesos mineros, industriales, comerciales, financieros y de servicios en general, todo lo cual se traduce en trabajo, progreso y desarrollo de los pueblos.

7.1. Consideraciones básicas

Es importante tomar en cuenta que todos los costos involucrados en la implementación de pararrayos en la línea 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco 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.

La Compañía Minera Antamina pierde por disminución de energía la suma de 300,000 dólares hora por dejar de producir.

Promedio de las Perturbaciones

El promedio de las perturbaciones de la L-2254 durante los años 2002 a 2005 que originaron una disminución de carga a la Compañía Minera Antamina es $Pd=4$

Dónde:

Pd = Promedio de Perturbaciones

Costos de Adquisición y Montaje

Los costos para la adquisición y montaje de los pararrayos (Cam) TLA en la línea 2254 es de:

Numero de Pararrayos (NP)= 65

Costo del pararrayo e instalación (CPI) = 3,500 Dólares Americanos

$Cam = NP \times CPI = 65 \times 3500 = 227,500$ Dólares Americanos

Reducción de las Perturbaciones

Las reducciones es de 4 a 1 indicando una disminución del 75% para el periodo en mención: $R= 75\%$

Dónde:

R= Reducción de perturbaciones

Costo Neto Periodo 2006

Según los datos estadísticos proporcionados por los operadores de la subestación Vizcarra se presentó en este periodo 01 desconexión la cual afectó el proceso productivo de la Compañía Antamina presentando una pérdida de:

$$C_n = N \times C_f$$

$$C_n = 1 \times 150\,000$$

$$C_n = 150\,000 \text{ Dólares Americanos}$$

Dónde:

C_n = Costo Neto

C_f = Costo por Falla = 150,000 Dólares Americanos

N = Numero de Perturbaciones de L-2254 que afectan a la L-2255

7.2. Costo Total

El costo total estará representado por los costos de montaje más los costos netos producidos por una falla durante el periodo Octubre Diciembre del 2006.

$$C_t = C_{am} + C_n$$

$$C_t = 377,500 \text{ Dólares Americanos}$$

Dónde:

C_t = Costo Total

Beneficio Obtenido

Como solamente se redujeron las perturbaciones de la L-2254 de 4 a 1 esto equivale a un ahorro de 3 fallas en el periodo octubre-diciembre del 2006 por lo que el beneficio será:

$$Bf=R \times Pd \times Cf$$

$$Bf= 0.75 \times 4 \times 150\ 000$$

$$Bf= 450\ 000 \text{ Dólares Americanos}$$

Dónde:

$$Bf= \text{Beneficio Obtenido}$$

7.3. Beneficio Costo

El cociente beneficio costo deberá ser mayor que 1 para garantizar la rentabilidad del proyecto

$$Bf/Ct = 450\ 000/377,500$$

$$Bf/Ct = 1.20 > 1$$

Se logró disminuir de 4 Perturbaciones que afectan el normal desempeño de la L-2255 a 1 desconexión, representando para esta un ahorro por continuidad de operación de: 72,500 \$ USA.

Queda demostrada la eficacia de los pararrayos en línea los cuales ayudan a mejorar el apantallamiento de las líneas eléctricas expuestas a descargas atmosféricas.

La instalación de los pararrayos en línea representa un efecto multiplicador para la subestación Vizcarra, porque al evitar las Perturbaciones de la L-2254 estamos incrementando también la disponibilidad de la línea L-2255.

CONCLUSIONES

1. Los altos niveles cerámicos, la vulnerabilidad del blindaje y los elevados valores de resistencias en la línea de transmisión 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco, justifican técnicamente la implementación de pararrayos de línea
2. La inversión económica para la implementación de pararrayos en la línea 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco se compensa si se comparan todos los beneficios que obtienen la mina Antamina con la continuidad del transporte de potencia, principalmente porque se garantizan los servicios básicos, financieros, industriales y productivos.
3. En la primera etapa se instalaron en la línea de transmisión 2254-220 kV Cerro de Pasco-Huánuco 65 pararrayos, en 45 torres, teniendo en cuenta para valores de resistencia de puesta a tierra mayores o iguales a 7Ω se instalaran un pararrayo en cada torre y valores de resistencia a tierra superior a 14Ω dos pararrayos en cada torre, además considerando que en zonas que registran gran incidencia de descargas atmosféricas, existe alta probabilidad de falla, protegiendo dichos puntos o torres en sus tres fases.
4. El desarrollo para determinar las especificaciones de los pararrayos llevados a cabo en el capítulo 2, 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.

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 220 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 México**. 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.

ANEXOS

LINEA L- 2254 TORRE	FASE			PARARRAYO
	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR	TLA
001	x	X		2
004	x			1
006	x	X		2
013	x			1
028	x	X		2
029	x			1
037	x			1
043	x			1
049	x			1
055	x	X		2
058	x			1
			TOTAL	15

LINEA L- 2254 TORRE	FASE			PARARRAYO
	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR	TLA
059	x	x		2
065	x			1
079	x			1
085	x			1
094	x			1
096	x			1
101	x	x		2
104	x			1
			TOTAL	10

LINEA L- 2254 TORRE	FASE			PARARRAYO
	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR	TLA
116	x			1
124	x			1
139	x	x		2
140	x	x		2
143	x			1
144	x	x	x	3
150	x	x		2
153	x			1
154	x			1
170	x			1
			TOTAL	15

LINEA L- 2254 TORRE	FASE			PARARRAYO
	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR	TLA
175	x	x		2
176	x			1
179	x			1
198	x	x		2
199	x	x	x	3
203	x	x		2
208	x			1
210	x			1
			TOTAL	13

LINEA L- 2254 TORRE	FASE			PARARRAYO
	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR	TLA
238	x	x		2
239	x	x		2
246	x			1
255	x	x		2
279	x			1
280	x			1
286	x			1
287	x	x		2
			TOTAL	12

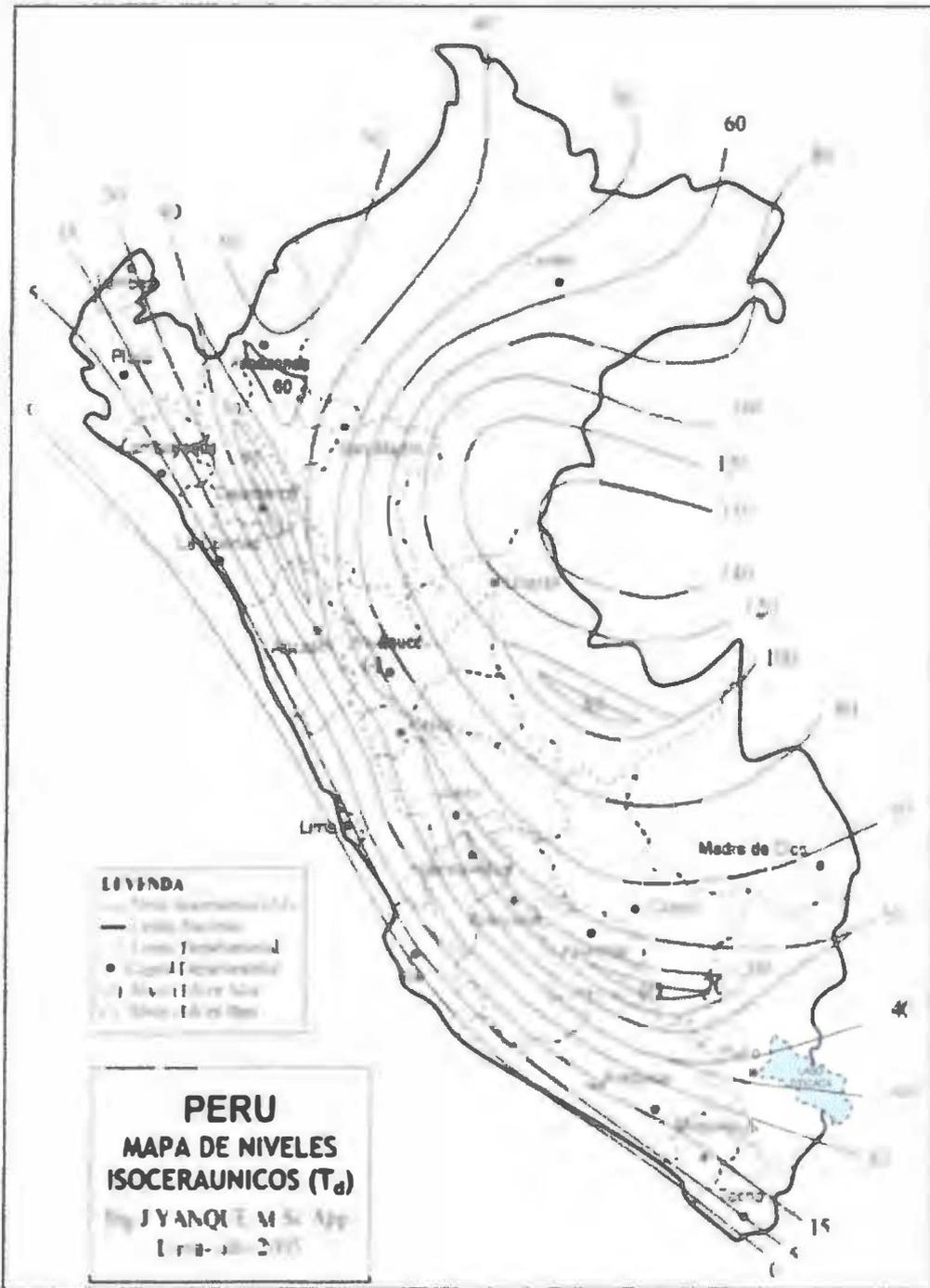
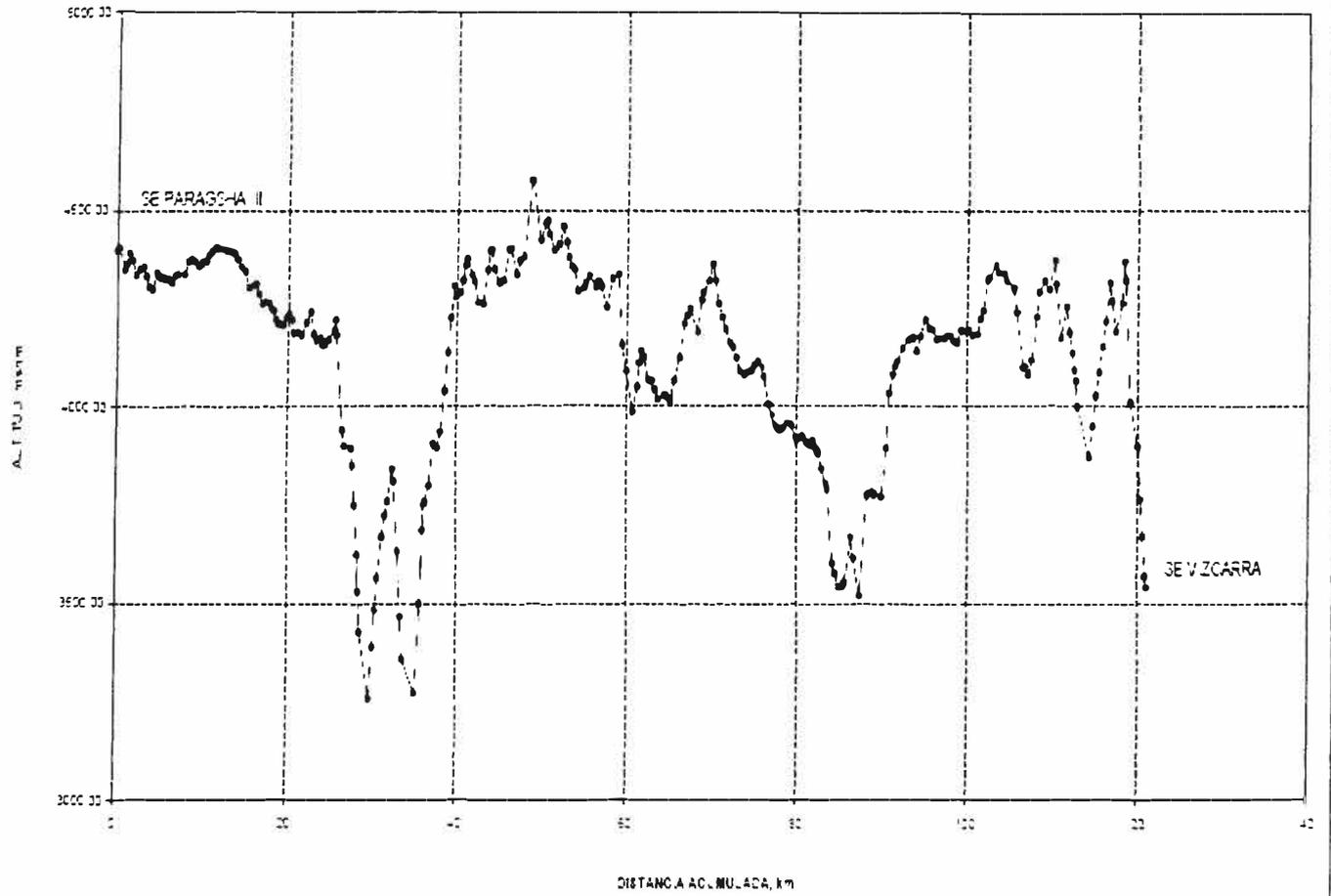


Fig. 4 Mapa de Niveles Isocecaunicos (T_d) Cortesia de In. Juan Yanque

LT Paragsha II - Vizcarra 220 kV

PERFIL GENERAL DEL TRAZO





GLOSARIO

Aislamiento polimérico, Aislamiento cuyo exterior es de material epóxido 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 atmosféricas 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 transportar la potencia eléctrica entre dos puntos y que físicamente está 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 sistemas eléctricos de potencia.

Termografía infrarroja, Medición de los niveles de temperatura en cualquier superficie mediante la aplicación de rayos infrarrojos.

INFORMACIÓN TÉCNICA

TLA

- Transmission Line Surge Arresters up to 230 kV

Utility

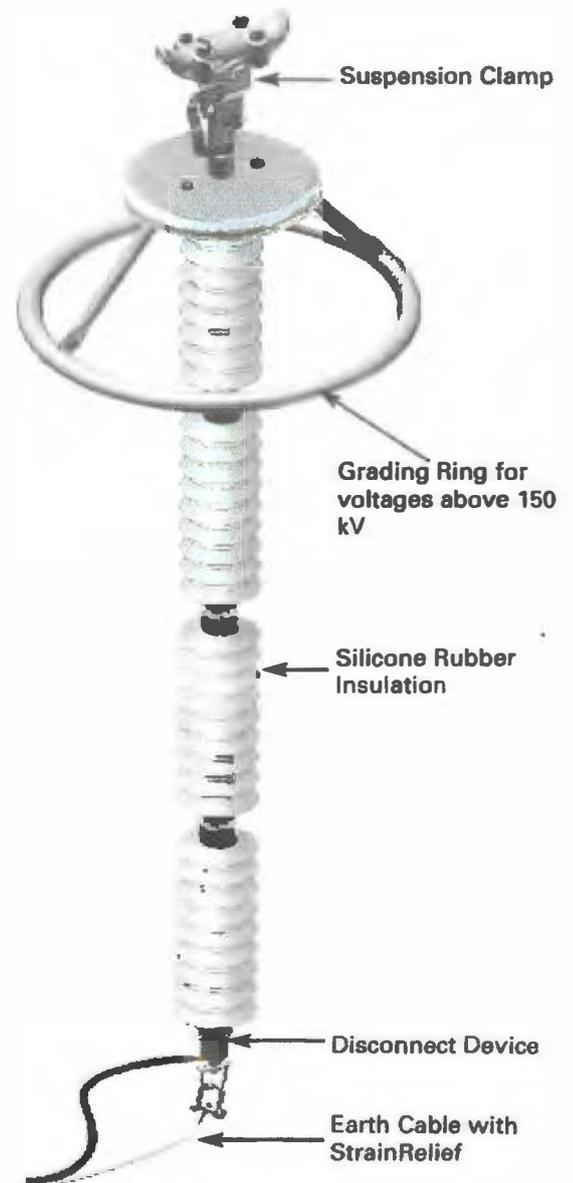
- Utilities are required by demand to increase availability and reliability of transmission systems. Therefore eliminating operational high cost outages and mandatory penalties is high on the agenda.

Key Features

- HV arrester suspended from a transmission line giving enhanced transmission line performance.
- Increasing system line voltage on standard insulated transmission lines.

Benefits of TLA Applications

- Minimising circuit breaker operation with possible system outage resulting from back flashover on the transmission line.
- Switching overvoltages are absorbed over the length of the line reducing the severity of surge at the substation.
- Transmission systems can be operated even where sub-soil gives poor tower footing resistance.
- Eliminating interrupted power supply for sensitive industrial processes.
- Installing Transmission Line Arresters on a standard 3 phase voltage system along the line, at calculated intervals, allows for optimum performance of the TLA, to give an increased system line voltage. Therefore eliminating the need to increase the standard insulation level required on conventional system upgrade.



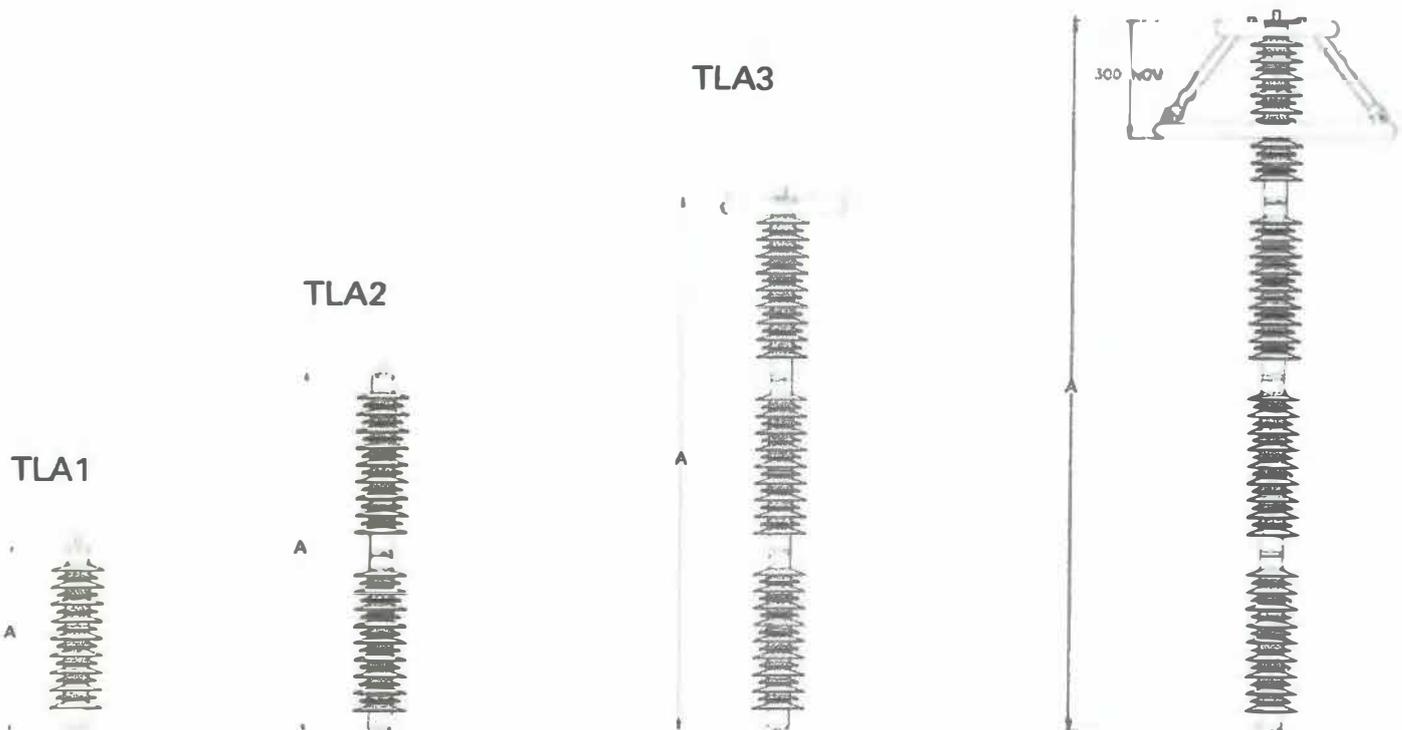
Electrical Performance

Specification:	IEC60099-4
Classification:	10kA
Voltage Rating:	15 to 192kV
High Current Performance:	100kA
Line Discharge Class:	2
Minimum Energy Capability:	
4.5kJ/kV at Ur according to IEC60099-4 (Clause 7.4.2 table 4 and 7.5.5.5)	
TLA1	15 - 45 kV
TLA2	48 - 96 kV
TLA3	108 - 144 kV
TLA4	150 - 192 kV
• Disconnect Device tested in accordance with IEC 60099-4 Class2.	
• Insulation Material:	Silicone Rubber
• Vibration Tested	Report No. BOE002000



TLA3-120 - 138 kV System, Brazil

TLA Dimensions



Protective Characteristics

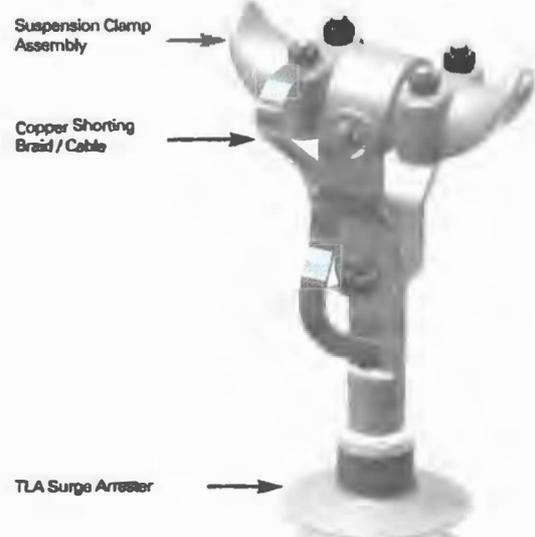
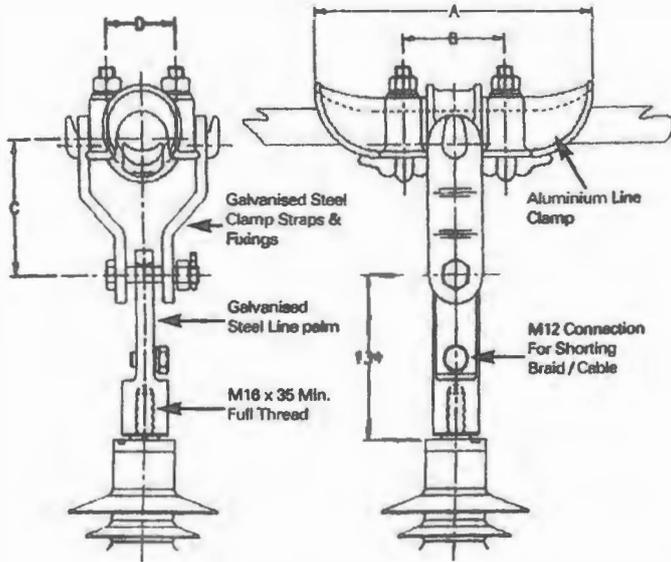
Product Code	Rating Voltage kV	Max. cont. operating voltage (COV) kV	Temporary over-voltage capability for 1 sec (TOV) kV	Max Residual voltage kV crest with current wave					Steep Current Residual Voltage 10 kA kV Crest
				Switching surge 30/60 μ S		Lightning Current 8/20 μ S			
				125 A kV	500 A kV	5 kA kV	10 kA kV	20 kA kV	
TLA1B15L1E1M2	15	12	17.1	31.1	33.3	41.4	45.9	51.6	46.7
TLA1B18L1E1M0	18	14	20.5	39.2	41.7	50.5	54.4	61.8	59.5
TLA1B21L1E1M0	21	17	24.0	43.8	46.5	56.4	61.4	69.0	67.1
TLA1B24L1E1M0	24	19	27.4	50.1	53.2	64.5	69.5	78.9	75.6
TLA1B27L1E1M0	27	22	30.8	54.8	58.2	70.6	76.3	86.4	83.3
TLA1C30L1E1M0	30	24	34.2	60.9	64.8	78.5	84.6	96.0	92.0
TLA1C36L1E1M0	36	29	41.1	71.8	76.3	92.4	100	113	108
TLA1C39L1E1M0	39	31	44.5	76.4	81.2	98.4	106	120	115
TLA1E42L1E1M0	42	34	47.9	82.7	87.8	106	115	130	125
TLA1E45L1E1M0	45	36	51.3	88.8	94.4	114	123	140	134
TLA2C48L1E1M0	48	38.4	54.8	93.9	100	121	130	148	142
TLA2C60L1E1M0	60	48	68.4	115	122	148	160	182	174
TLA2C72L1E1M0	72	57.6	82.0	137	146	176	190	216	207
TLA2C75L1E1M0	75	60	85.5	144	153	186	200	227	218
TLA2E84L1E1M0	84	67.2	95.8	159	169	204	220	250	240
TLA2E96L1E1M0	96	76.8	109	182	193	234	252	286	275
TLA3C108L1E1M0	108	86.4	123	202	215	260	281	319	305
TLA3C120L1E1M0	120	96	137	225	239	286	312	354	339
TLA3E138L1E1M0	138	110	157	261	277	336	362	411	394
TLA3E144L1E1M0	144	115	164	271	288	349	377	427	410
TLA4C150L1E1M0	150	120	171	285	303	367	396	449	430
TLA4E168L1E1M0	168	134	192	314	333	404	435	494	474
TLA4E180L1E1M0	180	144	205	338	359	435	470	533	511
TLA4E192L1E1M0	192	154	219	376	399	484	521	594	591

Mechanical and Reference Information

Total Creepage mm (nom)	Overall height mm (max) A	Drawing Reference	Pivot Suspension Clamp Drawing Reference	Disconnect Drawing Reference	Strain Relief System Drawing Reference	Data Sheet Reference
				E1	E2	
930	321	BOW-19-001	BOW-19-011	BOW-19-012	-	BOW-EPP-TLA1B-15
930	321	BOW-19-001	BOW-19-011	BOW-19-012	-	BOW-EPP-TLA1B-18
930	321	BOW-19-001	BOW-19-011	BOW-19-012	-	BOW-EPP-TLA1B-21
930	321	BOW-19-001	BOW-19-011	BOW-19-012	-	BOW-EPP-TLA1B-24
930	321	BOW-19-001	BOW-19-011	BOW-19-012	-	BOW-EPP-TLA1B-27
1310	476	BOW-19-002	BOW-19-011	BOW-19-012	-	BOW-EPP-TLA1C-30
1310	476	BOW-19-002	BOW-19-011	BOW-19-012	-	BOW-EPP-TLA1C-36
1310	476	BOW-19-002	BOW-19-011	BOW-19-012	-	BOW-EPP-TLA1C-39
2000	476	BOW-19-003	BOW-19-011	BOW-19-012	-	BOW-EPP-TLA1E-42
2000	476	BOW-19-003	BOW-19-011	BOW-19-012	-	BOW-EPP-TLA1E-45
2620	952	BOW-19-004	BOW-19-011	-	BOW-19-013	BOW-EPP-TLA2C-48
2620	952	BOW-19-004	BOW-19-011	-	BOW-19-013	BOW-EPP-TLA2C-60
2620	952	BOW-19-004	BOW-19-011	-	BOW-19-013	BOW-EPP-TLA2C-72
2620	952	BOW-19-004	BOW-19-011	-	BOW-19-013	BOW-EPP-TLA2C-75
4000	952	BOW-19-005	BOW-19-011	-	BOW-19-013	BOW-EPP-TLA2E-84
4000	952	BOW-19-005	BOW-19-011	-	BOW-19-013	BOW-EPP-TLA2E-96
3930	1428	BOW-19-006	BOW-19-011	-	BOW-19-013	BOW-EPP-TLA3C-108
3930	1428	BOW-19-006	BOW-19-011	-	BOW-19-013	BOW-EPP-TLA3C-120
6000	1428	BOW-19-007	BOW-19-011	-	BOW-19-013	BOW-EPP-TLA3E-138
6000	1428	BOW-19-007	BOW-19-011	-	BOW-19-013	BOW-EPP-TLA3E-144
5240	1904	BOW-19-008	BOW-19-011	-	BOW-19-013	BOW-EPP-TLA4C-150
8000	1904	BOW-19-009	BOW-19-011	-	BOW-19-013	BOW-EPP-TLA4E-168
8000	1904	BOW-19-009	BOW-19-011	-	BOW-19-013	BOW-EPP-TLA4E-180
8000	1904	BOW-19-009	BOW-19-011	-	BOW-19-013	BOW-EPP-TLA4E-192

Accessories

TLA Pivot Suspension Clamp



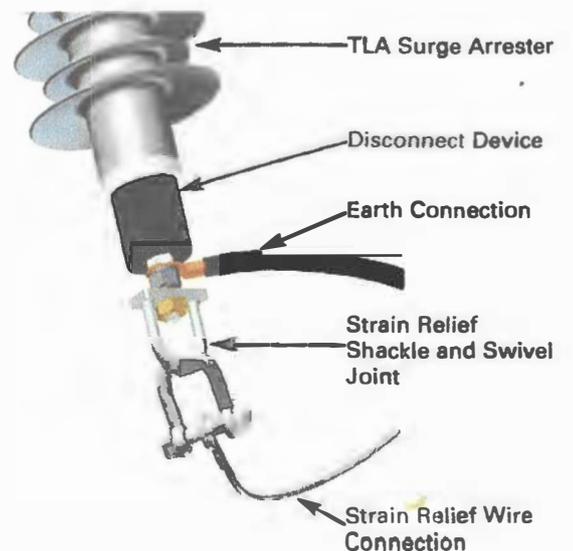
Clamp	Conductor Range Dia.	Dimensions mm				~U~ Bolt	Weight
		A	B	C	D	Torque	
L2	9.5 - 19 mm	180	80	90	40	45 Nm	1.8 kgs
L3	18 - 30 mm	217	90	110	50	45 Nm	3.0 kgs
L4	30 - 45 mm	267	100	120	64	75 Nm	4.3 kgs
L5	45 - 65 mm	320	120	140	86	75 Nm	6.0 kgs

Earthing Configuration

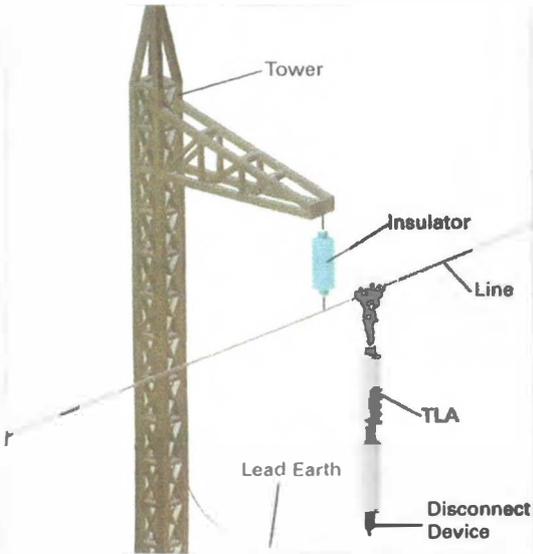
TLA Disconnect - E1



TLA Strain Relief System - E2

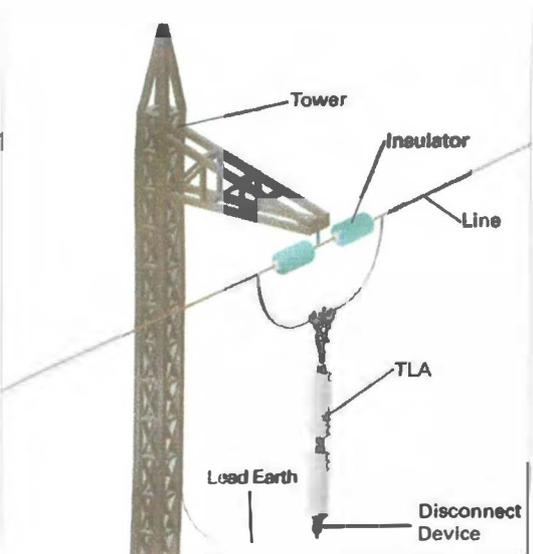


Tower installations

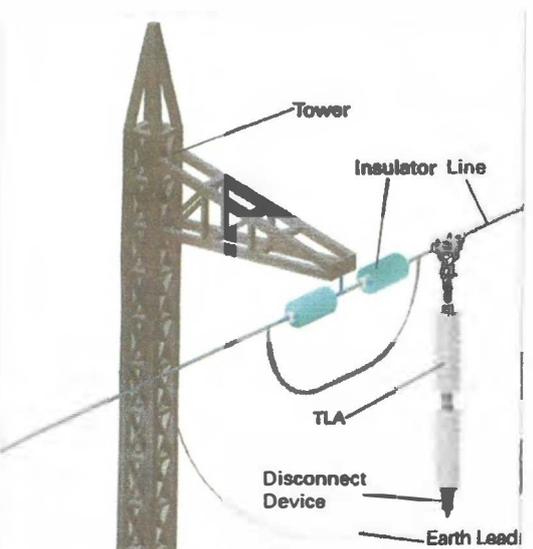


The number of the TLA installed on the tower depends basically on the tower geometry and configuration as well as the earthing transient impedance behaviour.

For towers with a horizontal conductor configuration, conductors in a single line across the tower, normal practice is to install a TLA on both of the two outside phase conductors.



For towers with a vertical conductor configuration, conductors arranged above each other, the resultant transient voltage across the insulators string sets is usually higher at the bottom phase, which presents a lower distance to the soil and lowest coupling with the shield wire. Therefore, transmission lines with a vertical configuration and low tower footing impedance, only one TLA is necessary to install on the bottom phase, but for higher impedances it might be necessary install two and sometimes three TLAs.



A direct lightning strike to the transmission line without a shield wire will cause the discharge current $i(t)$ to divide into two current waves travelling on the both directions down the line with magnitude of $i(t)/2$ (it is valid when we consider the impedance of the discharge channel as infinite). This current therefore produces a voltage wave $v(t)$ in both directions which considering as a first approach that the transmission line is without losses and distortions, results in a voltage along the line which can be estimated by:

$$V(t) = Z_0 \cdot i(t) / 2$$

For lines with shield wires, the voltage on the top of the tower will be significantly lower and will depend on the lightning striking point, the tower impedance and mainly of the earthing transient behaviour.