

DISMINUCION DE LOS EFECTOS DE LA CORRIENTE ALTERNA Y DE LAS
DESCARGAS ATMOSFERICAS EN LAS LÍNEAS DE TRANSPORTE DE
HIDROCARBUROS Y EN LOS SISTEMAS DE CONTROL DE CORROSION DE BP
EXPLORATION EN CASANARE.

DERIAN BERNARDO DUQUE SALDAÑA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACION INGENIERIA DEL GAS
BUCARAMANGA
2005

DISMINUCION DE LOS EFECTOS DE LA CORRIENTE ALTERNA Y DE LAS
DESCARGAS ATMOSFERICAS EN LAS LÍNEAS DE TRANSPORTE DE
HIDROCARBUROS Y EN LOS SISTEMAS DE CONTROL DE CORROSION DE BP
EXPLORATION EN CASANARE.

AUTOR
DERIAN BERNARDO DUQUE SALDAÑA

Monografía para optar el título de especialista en ingeniería del gas

Director
Eduardo Crisancho Higuera
Especialista en ingeniería del gas

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACION INGENIERIA DEL GAS
BUCARAMANGA
2005

RESUMEN

TITULO: DISMINUCION DE LOS EFECTOS DE LA CORRIENTE ALTERNA Y DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS EN LINEAS DE TRASPORTE DE HIDROCARBUROS Y EN LOS SISTEMAS DE CONTROL DE CORROSION DE BP EN CASANARE (*).

AUTOR: DERIAN BERNARDO DUQUE SALDAÑA (**).

PALABRAS CLAVES: Mitigación, corriente alterna, descargas atmosféricas, gasoductos, rayos.

DESCRIPCION: Las líneas de transmisión de energía eléctrica construidas paralelas o cerca de las líneas de flujo de los pozos a las facilidades de producción de los campos de Cusiana y Cupiagua de BP en Casanare, junto con gran cantidad de caída de rayos debido al alto nivel ceráúneo en la zona, Pueden presentar inducciones de alto voltajes que ponen en riesgo la seguridad del personal de operación y la integridad de la tubería, al producir daños y complicaciones en el revestimiento y en el sistema de protección catódica existente.

Se muestra las recomendaciones para Mitigar estos efectos perjudiciales utilizando dispositivos de protección de estado sólido y alimentación solar del sistema de control de corrosión por corriente impresa. Reduciendo los costos de operación y mantenimiento ocasionados por daños en los equipos de protección catódica y reparación continua de la tubería, aumentando la confiabilidad del sistema de transporte y disminuyendo el riesgo de choque eléctrico a los operadores.

En el primer capitulo se describe como la corriente alterna inducida influye en la corrosión y seguridad de las personas, en el segundo capitulo, los problemas creados por las descargas atmosféricas cerca o en las tuberías y equipos del sistemas de protección catódica, y en el tercer capitulo una selección de dispositivos de protección y mitigacion para el caso particular de las líneas de flujo de Cusiana y Cupiagua. En el Cuarto capitulo se desarrolla un diseño de protección catódica con sistema solar para mitigar los efectos causados por la alimentación con corriente Alterna.

* Monografía.

** Facultad de ciencias Físico químicas
Especialización de ingeniería del gas
Ing. Eduardo Crisancho Higuera

SUMMARY

TITLE: DISMINUCION OF THE ALERTING CURRENT AND OF THE LIGHTNING EFECTOS IN TRASPORTE'S LINES OF HYDROCARBONS AND IN THE SYSTEMS OF CONTROL OF BP'S CORROSION IN CASANARE (*).

AUTHOR: DERIAN BERNARDO DUQUE SALDAÑA (**).

KEY WORDS: Mitigation, alternating current, lightning, gas pipelines, cathodic protection.

DESCRIPTION: The electrical constructed parallel lines of transmission of energy or near the lines of flow of the wells to the facilities of production of the fields of BP's Cusiana and Cupiagua in Casanare, together with great quantity of lightning due to the high ceraunic level in the zone, inductions of high place can present voltages that put in risk the safety of the personnel of operation and the integrity of the pipeline, on having produced damages and complications in the coating and in the system of cathodic protection existing.

Its appear himself the recommendations To mitigate these harmful effects using protections devices of solid state and solar nourishment of the system of control of corrosion for printed current. Reducing the costs of operation and maintenance caused by damages in the equipments of cathodic protection and repair continues of the pipeline, increasing the reliability of the system of transport and diminishing the risk of electrical shock to the operators.

In the first chapter it is described as the alternating current induced influences in the corrosion and safety of the persons, in it second chapter, the problems created by the Lighting nearby or in the pipelines and equipments of systems of cathodic protection, and in it third chapter a selection of protections devices and mitigation for the particular case of the lines of Cusiana and Cupiagua's flow. In the Fourth chapter there develops a design of cathodic protection with solar system to mitigate the effects caused by the nourishment with Alternate current.

* Monograph

** Faculty of sciences Physical chemical.
Specialization of engineering of the gas.
Ing. Eduardo Cristancho Higuera.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION	10
1. PROBLEMAS CREADOS POR INDUCCION DE CORRIENTE ALTERNA	12
1.1 INTERFERENCIA ELECTROESTATICA O CAPACITIVA	14
1.2 INTERFERENCIA RESISTIVA U OHMICA	15
1.3 INTERFERENCIA ELECTROMAGNETICA O INDUCTIVA	16
1.4 ARCO DE POTENCIA ELECTRICA	18
1.5 CORRIENTES DE FALLA	19
1.6 VOLTAJES DE CONTACTO	20
1.7 CORROSION POR INDUCCION DE CA	22
1.8. CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA PROTECCION DE AC INDUCIDA EN TUBERIAS	24
1.8.1 Información requerida para el estudio de la mitigación de interferencia de la CA	26
1.9 DISPOSITIVOS PARA DESCARGA AC INDUCIDA EN TUBERIAS	28

1.9.1 Sistema de puesta a tierra.	28
1.9.2 Celdas de polarización.	29
1.9.3 Bloqueo de estado sólido de la corriente continua.	30
1.9.4 Descargadores de rayos y varistores de oxido de metal.	31
1.9.5 Discriminadores de corriente CA-CC.	32
2. PROBLEMAS CREADOS POR LOS RAYOS EN LAS TUBERIAS DE FLUJO	34
2.1 FORMACION DEL RAYO	34
2.2. NORMAS SOBRE PROTECCION CONTRA RAYOS	35
2.3 EFECTOS DE LAS CAIDAS DE RAYOS	36
2.4 FILOSOFIA DE PROTECCION	39
2.5 SISTEMA INTEGRAL DE PROTECCION CONTRA RAYOS	42
2.6 METODOLOGIA PARA IMPLEMENTAR EL SISTEMA INTEGRAL DE PROTECCION CONTRA RAYOS EN ESTRUCTURAS	43
2.7 EVALUACION DEL FACTOR DE RIESGO PARA PROTECCION CONTRA RAYOS	44
3. SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS PARA MITIGAR EFECTOS DE AC Y DE CAIDA DE RAYOS EN LINEAS DE FLUJO DE BP EN CASANARE	50
3.1 SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS DE PROTECCION CONTRA CA INDUCIDA EN LINEAS DE FLUJO DE BP	50

3.2 SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS DE PROTECCION CONTRA DESCARGAS ATMOSFERICAS EN LINEAS DE FLUJO DE BP EN CASANERE	51
3.2.1 Evaluación del factor de riesgo del rectificador CPR-001 del CPF de Cupiagua.	51
3.2.2 Cálculos de sobretensiones inducidas	54
3.2.3 Selección de dispositivos	59
4. DISEÑO DE PROTECCION CATODICA CON ALIMENTACION PANELES SOLARES	62
4.1 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE PROTECCION CATODICA	63
5. CONCLUSIONES	68
BIBLIOGRAFIA	70
ANEXO A	71

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Valores de la corriente alterna de 60 hertz que causan afectos en los seres humanos	21
Tabla 2. Definición de las zonas de protección contra el rayo	41
Tabla 3. Índice de riesgo por rayos	46
Tabla 4. Valores del índice relacionado con el uso de la estructura	46
Tabla 5. Valores del índice relacionado con el tipo de estructura	47
Tabla 6. Valores del índice relacionado con la altura y el área de la estructura	47
Tabla 7. Niveles de Gravedad	48
Tabla 8 Factor de riesgo	48
Tabla 9. Valores de protección recomendados por ANSI - IEEE C62.41-1991, según la categoría de localización	58
Tabla 10. Rectificadores de protección catódica operando en Cusiana y Cupiagua	61
Tabla 11. Dimensionamiento del sistema solar	64
Tabla 12. Características eléctricas de paneles solares BP 380	66

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Corrientes de sistema trifásicos	13
Figura 2. Distribución geométrica de fases	17
Figura 3. Ondas de corriente de choque de 10/350 μ s y de 8/20 μ s	39
Figura 4. Elementos del sistema integral de protección contra rayos	43
Figura 5 Diagrama de bloques del sistema protección catódica con energía solar	62
Figura 6. Arreglo de 24 paneles solares	67

GLOSARIO Y NOMENCLATURA

A: Amperios

AMPERIO: Unidad de medida de corriente eléctrica.

BP: British petroleum, compañía explotadora de hidrocarburos.

CA: Corriente Alterna

CC: Corriente Continua

Ciclo: Se refiere a un periodo de onda de corriente alterna de 60 Herz

CIGRE: Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas.

CORRIENTE DE FALLA: Corriente producida al ocurrir un corto circuito, entre fases o fase a tierra.

CORTO CIRCUITO: Unión que se produce accidentalmente entre dos conductores ó estructuras de diferente potencial, produciendo una descarga.

CPF: Centro de Facilidades de Producción.

DESCARGA DIRECTA: Impacto del rayo que se produce en el equipo a proteger, en el pararrayos de protección o en su cercanía inmediata.

DESCARGA INDIRECTA: Impacto del rayo que se produce en un lugar lejano del equipo a proteger.

DDT: Densidad de Descargas de rayos a tierras

DIFERENCIA DE POTENCIAL: Diferencia de tensión eléctrica (Voltaje) entre dos puntos.

EMF: Campo Electromagnético.

FRECUENCIA: Numero de ciclos por segundo de una onda.

FBE/PE: Apesto de Epóxico / Polietileno

HERZ: Unidad de medida de frecuencia de una onda.

Hz: Herz.

HVAC: Corriente Alterna de Alto Voltaje.

I_{abs} : Corriente Pico Absoluto Promedio del Rayo.

ICONTEC: Instituto Colombiano de Normas Técnicas.

IEC: Comisión electrotécnica Internacional

IEEE: Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

kA: Kiloamperio

kV: Kilovoltio

NACE: Sociedad Internacional de La Corrosión

NC: Nivel Ceráuneo.

NIVEL CERAUNEO: Días tormentosos al año.

NTC: Norma Técnica Colombiana.

POTENCIAL DE CONTACTO: Diferencia de potencial existente entre la mano en contacto con una estructura metálica y los pies.

POTENCIAL DE PASO: Diferencia de potencial existente entre ambos pies de una persona.

PROTECCION IP-65: Protección contra agua y polvo según clasificación de áreas.

SIPR: Sistema Integral De Protección Contra Rayos.

SCADA: Sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos

V: Voltio.

INTRODUCCION

Frecuentemente las tuberías enterradas están siendo instaladas en los corredores de las líneas de transmisión de la energía eléctrica, La instalación de un material conductor de electricidad, como son las tuberías, paralelas a las líneas de alta tensión dan lugar a problemas de inducción complicados en la tubería. Este problema de interferencia de la Corriente Alterna en tuberías enterradas es conocido desde hace cerca de 35 años, sin embargo solo desde hace 15 años, se le ha dado importancia, debido al empeoramiento del problema por las mejoras en tecnología de los revestimientos de la tubería y la tendencia creciente de situar tuberías en derechos de vías cerca de líneas de transmisión eléctricas de alto voltaje.

Adicionalmente las líneas de flujo de los campos de Cusiana y Cupiagua de BP EXPLORATION en Casanare, están ubicadas en una región de alto nivel ceráuneo (días tormentosos al año). Esto no se tuvo en cuenta durante la etapa de diseño y construcción, y en la actualidad no existe ninguna medida de control ni algún dispositivo de protección contra sobretensiones de corriente alterna y por descargas atmosféricas cerca de equipos de sistemas de protección catódica, colaborando a la corrosión y aumentado el riesgo de choque eléctrico en las personas.

El objeto principal de este documento es mostrar la importancia de crear mecanismos de mitigación de los efectos nocivos de la corriente alterna y la caída de rayos cerca de tuberías enterradas.

En el primer capítulo se describe como la corriente alterna inducida influye en la corrosión y seguridad de las personas, en el segundo capítulo, los problemas creados por las descargas atmosféricas cerca o en las tuberías y equipos del sistemas de protección catódica, y en el tercer capítulo una selección de dispositivos de protección y mitigación para el caso particular de las líneas de flujo de Cusiana y Cupiagua. En el Cuarto capítulo se desarrolla un diseño de protección catódica con sistema solar para mitigar los efectos causados por la alimentación con corriente Alterna.

1. PROBLEMAS CREADOS POR INDUCCION DE CORRIENTE ALTERNA

Las tuberías situadas en derecho de vía es un problema realmente serio que pone en riesgo la seguridad de los operadores y afecta de la integridad de la tubería. La instalación de tuberías en los corredores de líneas de transmisión de energía eléctrica de alto voltaje induce voltajes de corriente alterna (CA) en ellas, esto puede ser causado por un desequilibrio en el sistema de la transmisión, y por altos voltajes en los terrenos cercanos a las torres de la transmisión producidas por descargas atmosféricas ó fallas de algunas fases al ser puestas a tierra.

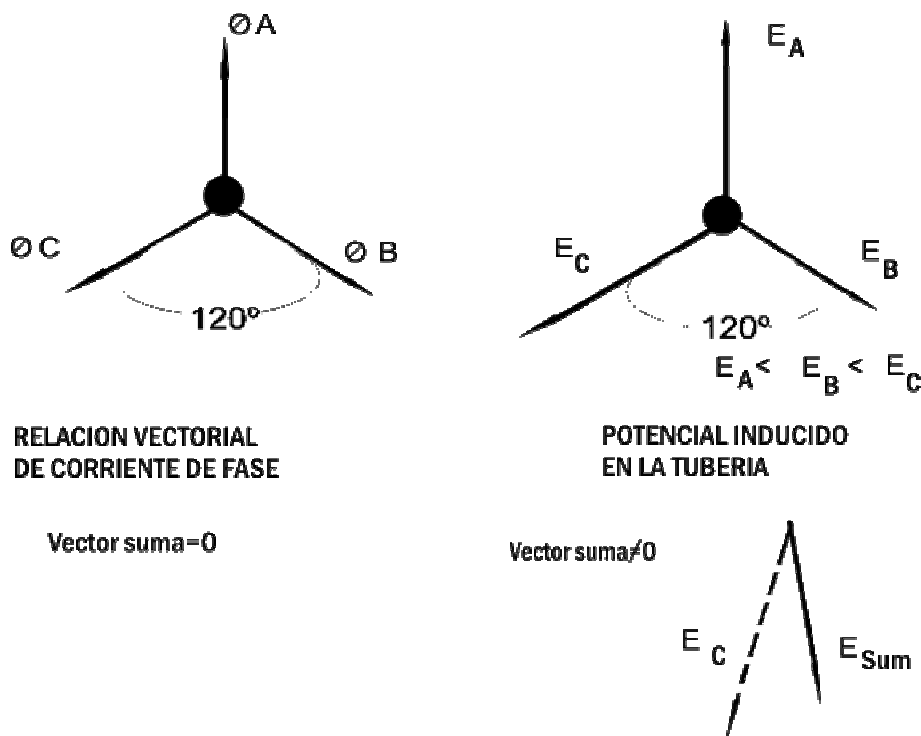
Cuando un voltaje de CA Inducido existe por un periodo largo de tiempo en una tubería, puede ser potencialmente peligroso para la vida del personal de operación y mantenimiento al tocar ó acercarse a la tubería o a componentes del sistema como válvulas, lanzadores de marrano y otros. Además, se puede ocasionar corrosión de la tubería en el punto donde se descarga la CA.

Para tratar este problema, las tuberías protegidas catódicamente se deben poner a tierra con un dispositivo que pase solamente la CA, y bloquee la Corriente continua (CC). Esto atenúa la CA y mantienen el sistema de protección catódica en la tubería.

La energía eléctrica se transmite en tres fases, cada una por un cable por medio de una estructura en postes o torres a lo largo del derecho de vía. Cada fase sinusoidal de la corriente alterna esta desfasada 120° de las otras dos. Si cada fase es igual, la suma de las corrientes alternas en las tres fases y la suma de los campos magnéticos que resultan

de la corriente alterna de cada fase deben dar cero (figura 1). Si las corrientes de las fases son de diferente magnitud la suma vectorial de los campos magnéticos y del potencial inducido por estos será diferente de cero, por lo tanto las tuberías de acero que están instaladas cerca de estas líneas de transmisión tendrá un voltaje con respecto a tierra.

Figura 1. Corrientes de sistema trifásicos.



La moderna tecnología en revestimientos de la tubería con fusión de las capas de epóxico, tricapa y de FBE/PE usadas actualmente han hecho mas severo el problema de interferencia de la CA en tuberías. En el pasado, las tuberías revestidas con material de menor calidad tenían suficiente fuga a tierra, tal que los voltajes inducidos no eran un problema común. De hecho, una tubería desnuda sería una buena solución al problema

de la CA inducida. El excelente revestimiento usado en las líneas de flujo incrementa la dificultad de la mitigación de la CA, dejando pocos defectos en las capas para que la CA vaya a tierra.

Pueden ocurrir tres clases de interferencia de CA entre los sistemas de transmisión de la CA y las tuberías: electrostática o capacitiva, resistiva u óhmica, y electromagnética o inductiva.

1.1 INTERFERENCIA ELECTROESTATICA O CAPACITIVA

La Interferencia electrostática o capacitiva ocurre en las inmediaciones de las líneas de energía cuando la tubería se instala sobre soportes que la aisle bien del terreno. La tubería toma un voltaje con respecto al suelo, que es proporcional al voltaje en la línea de transmisión.

El campo eléctrico relacionado con un conductor de potencia causará que una corriente bien definida fluya constantemente entre la estructura metálica y la tierra, ya sea que esa estructura este soportada sobre el suelo o sólo suspendido en el aire. Esta corriente fluirá de la estructura a la tierra, parcialmente por el aire, como una corriente de desplazamiento, y parcialmente por rutas conductoras o semi- conductoras, como los soportes de madera, o los seres humanos que tocan la estructura. La magnitud de la corriente total que fluye de la estructura es función del tamaño de la tubería, la proximidad con los conductores de potencia, el nivel de voltaje de los conductores de potencia y su arreglo geométrico. La corriente total que fluirá entre la tubería metálica y tierra se distribuirá a tierra entre los diferentes caminos disponibles en proporción indirecta a la

respectiva resistencia eléctrica de cada camino. Por ejemplo, una varilla de tierra de 100 ohmios llevaría 10 veces más corriente a tierra que un ser humano de 1000 ohmios de resistencia, reduciendo en un factor de 10 la magnitud de la corriente de choque en el ser humano, por lo tanto, la interferencia capacitiva es típicamente un peligro durante la construcción, cuando la estructura es colocada en un soporte aislando, antes de ser instalada en el suelo. Las varillas de puesta a tierra proveen la suficiente protección, la necesidad de aterrizajes adicionales puede ser verificada con una medida simple con voltímetro. Los tramos de tubo soldados con autógena cerca de las líneas de alta tensión deben ser puestas a tierra cuando el voltaje nominal en las líneas excede los 110 kV y la longitud de la sección soldada con a excede los 100 metros.

1.2 INTERFERENCIA RESISTIVA U OHMICA

Interferencia resistiva u óhmica puede ocurrir al caer un rayo en una torre de transmisión, o al haber una falla de fase a tierra o cortocircuito. Cuando esto ocurre el flujo de corriente eleva el potencial eléctrico de la tierra, a menudo a miles de voltios, creando un gran cono de alto voltaje alrededor del sistema de aterrizaje de la torre. Si una tubería está situada dentro de esta área, el voltaje puede pasar al tubo por defectos del revestimiento o débil aislamiento, por esto puede resultar un arco eléctrico que dañará la capa o incluso la tubería misma, aparte de que si alguna persona que esta por fuera del cono de voltaje toca el tubo podría recibir un choque eléctrico debido a la diferencia de potencial entre la tubería y el suelo circundante. Se requiere medidas protectoras para la gente si el voltaje es elevado a niveles peligrosos de contacto, cuando excede 65 V para interferencia por largo tiempo, ó 1.000 V para interferencia a corto plazo; Entre estas medidas están el usar botas dieléctricas, guantes aislados, o el tapete dieléctrico. Sin

embargo, en ningún caso puede haber conexión directa entre la tubería y el sistema de puesta a tierra de la torre.

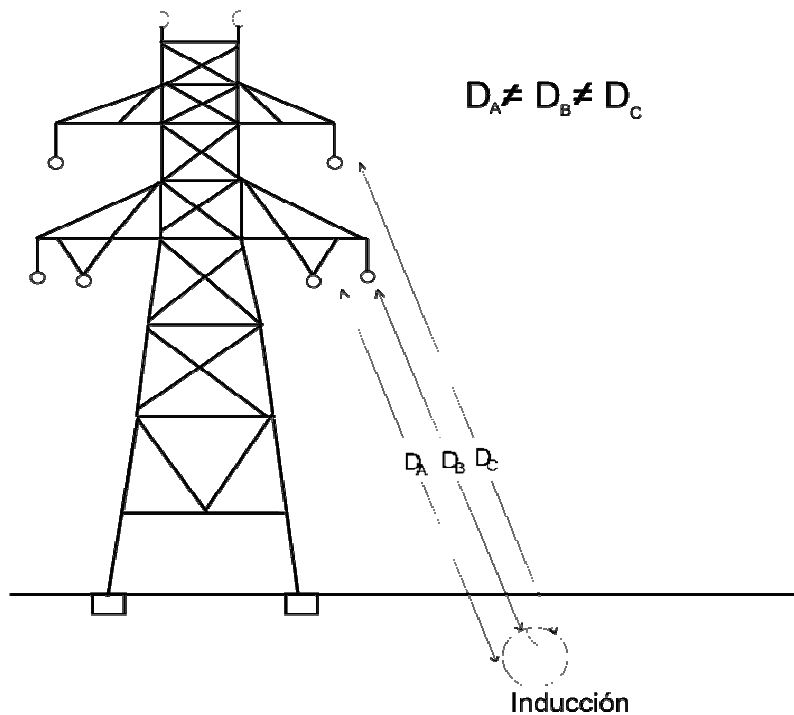
Las condiciones especiales se presentan si la tubería esta ubicada en las inmediaciones del sistema de puesta a tierra de una subestación eléctrica o de un transformador. Cuando ocurre una falla en la instalación se realiza una conexión duradera o transitoria con el terreno. El voltaje que se va a tierra será transferido a la tubería y aparecerá el voltaje del cono como voltaje del contacto. Los efectos de la interferencia resistiva son enérgicamente dependientes de varios factores, los más importante son los siguiente: la corriente de cortocircuito total, el calibre del cable a tierra para descargar la línea y la distancia a la fuente de potencia, el tamaño de las fundaciones y sistemas de tierras de los postes, torres o subestaciones a través de las cuales la corriente está fluyendo, y sobre la resistividad eléctrica del terreno en función de la profundidad. Dependiendo de la tubería y de su cubrimiento, el voltaje de contacto disminuye más o menos rápidamente en medida que aumenta la distancia.

1.3 INTERFERENCIA ELECTROMAGNETICA O INDUCTIVA

Interferencia electromagnética o inductiva en tuberías ocurre cuando se han tendido paralelas con las líneas transmisión trifásica de alto voltaje CA (HVAC). El voltaje inducido es debido a cualquier desequilibrio de la fase en las líneas como se vio anteriormente en la figura 1, conjuntamente con la distribución geométrica (figura 2), la distancia a las fases es proporcional a la magnitud del voltaje inducido. La probabilidad de interferencia es mayor al aumentar las corrientes de funcionamiento de las líneas, al aumentar la calidad del revestimiento de la tubería, a mayor longitud de paralelismo y la cercanía con las líneas de transmisión de HVAC, La magnitud del potencial inducido depende además de

otros factores como cambio en el arreglo de línea de alimentación o en la distancia de separación, el tipo de conductor usado en el cable de guarda sobre la línea de potencia, la resistencia del recubrimiento del tubo, el aterrizaje presente en la tubería, y la resistividad del terreno en función de la profundidad. El aterrizaje está presente en los puntos donde existen ánodos de sacrificio para el sistema de protección de catódica de la tubería.

Figura 2. Distribución geométrica de fases



Los voltajes son inducidos en la tubería por acoplamiento magnético con las líneas de alto voltaje, las corrientes resultantes que fluyen en la tubería crean una diferencia del voltaje entre la tubería y el suelo circundante.

Durante las condiciones de falla los voltajes producidos son particularmente altos. Además, los voltajes causados por la interferencia inductiva sobre el revestimiento cerca

del sitio del cortocircuito refuerzan los efectos causados por la interferencia resistiva así que ambos factores deben ser considerados juntos. Igualmente para los potenciales de contacto y de paso, los potenciales peligrosos producidos pueden extenderse fácilmente por muchos miles de kilómetros, tanto sin un corredor de línea de alimentación y más allá de los extremos del corredor. Una potencia considerable es transferida a una tubería por medio de la interferencia inductiva y puede resultar en corrientes de decenas o incluso cientos de amperios que circulan en la tubería durante condiciones máximas de operación de la red de energía y miles de amperios durante las condiciones de cortocircuito. Los picos máximos de potenciales tienden a existir en donde hay cambios repentinos en los parámetros enumerados arriba como afectar los voltajes producidos: éstas son generalmente ubicadas donde las líneas de energía y los gasoductos se desvían fuera del corredor o se cruzan una a otra, en subestaciones, o en ubicaciones de reorganización de fase de línea de energía. Instalar aterrizajes en un punto puede hacer los efectos significativamente peores en otro lugar, así que es importante considerar el sistema total cuidadosamente cuando se diseña la protección.

1.4 ARCO DE POTENCIA ELECTRICA

Durante una falla a tierra de una red de energía de CA, las torres de potencia de CA y la tierra circundante pueden desarrollar un potencial alto con la referencia a tierra lejana. Una estructura metálica larga, revestida o desnuda, tiende a mantener el potencial de tierra lejano. Peor todavía, si la tubería corre paralela a las líneas de alimentación de CA, luego en cualquier instante de tiempo, el potencial producido sobre la tubería tenderá a ser de polaridad opuesta al potencial de tierra cerca del lugar de la falla. De cualquier manera, el voltaje da como resultado que el tubo está sujeto a falla por sobrevoltaje de

cualquier elemento del circuito, puede ocurrir un arco de potencia, y dañar los elementos del circuito. Los elementos específicamente incluyen revestimiento, kits de aislamientos de juntas, puentes de tuberías, descargadores de relámpago, e instalaciones de protección de catódica. Si el gradiente de potencial en la tierra es lo suficientemente grande para ionizar la tierra, entonces puede ocurrir un arco directo del sistema de tierra de la red de energía a la estructura, los efectos se pueden extender de quemadura de arco al daño catastrófico de la tubería.

1.5 CORRIENTES DE FALLA

Una corriente de falla es una corriente que fluye a partir de un conductor a la tierra, o a otro conductor, debido a una conexión anormal, incluyendo un arco, entre los dos puntos. Una corriente de falla que fluye a la tierra se puede llamar una corriente de falla a tierra.

Las corrientes de falla pueden ocurrir cuando hay una ruptura en el aislamiento de la red de energía, por ejemplo en los aisladores cuando cae un rayo en una torre de transmisión, o si un cable se rompe y cae a la tierra. Cuando esto ocurre, hay un desequilibrio enorme de la energía, y suceden dos cosas:

- Se crea un gran nivel de voltaje CA Inducido en la tubería, sobre la sección afectada por el desbalance de fases
- Un cono enorme del voltaje se crea en el lugar donde la falla va a tierra.

La corriente de falla puede ser de varios miles de amperios en varios cientos de miles de voltios, creando una descarga considerable de energía. Afortunadamente, esto dura solamente algunos ciclos. Cualquier tubería en la trayectoria de la falla es un camino preferido para que la corriente siga, y desarrollará un alto voltaje. Cualquier persona que

toca el tubo en este instante, para operar una válvula, o tomar una lectura de protección catódica, tendrá lesiones serias (evento fatal), a menos que el voltaje pueda ser puesto a tierra adecuadamente.

En las fallas de fase es una ventaja usar los ánodos sacrificios, pero si ocurre una falla junto a un ánodo del Zinc, podría ser destruido, e incapaz de aterrizar la tubería adecuadamente para futuras mitigación de CA.

Aterrizar la tubería directamente a sistemas de puesta a tierras para mandar a tierra la tensión AC en la tubería no es una solución perfecta.

Los interruptores de protección contra fallas en las líneas de energía generalmente se activas en algunos ciclos de 60 Hz haciendo menos intensos los niveles de tensión inducidos.

1.6 VOLTAJES DE CONTACTO

Este voltaje ó potencial de "contacto", es la diferencia de potencial existente entre una estructura metálica y la tierra, al ser tocada la estructura por una persona, y puede que la corriente de CA fluya a la tierra a través de ella. Cuando existe un voltaje de CA Inducido por largo tiempo en la tubería, como resultado de largos tramos en paralelo con las líneas de transmisión eléctrica, no es seguro tocar la tubería o sus componentes. Cuando una estructura del metal, tal como una tubería, está bajo la influencia de campos eléctricos y una persona hace contacto con ella se conduce una corriente a través de su cuerpo a la tierra. La magnitud de la corriente depende de la resistencia eléctrica de su cuerpo y de

cómo esta en contacto con la tierra. Los efectos de la corriente de la CA que atraviesan el cuerpo se dan en la tabla 1.

Tabla 1. Valores de la corriente alterna de 60 hertz que causan afectos en los seres humanos

Corriente	Efectos
1 mA o menos	No se siente - no se vibra
1-8 mA	Sensación choque - no doloroso. El individuo puede moverse a su voluntad, no pierde el control muscular.
8-15 mA	Choque doloroso – El individuo puede moverse a su voluntad, no pierde el control muscular.
15-20 mA	Choque doloroso – El individuo no puede moverse a su voluntad, perdida del control muscular.
20-50 mA	Choque doloroso - contracciones musculares severas, dificultad para respirar.
50-100 mA	Fibrilación ventricular, puede llegar a la muerte si no se administrado un pronto masaje cardiaco.
100-200 mA	Se debe aplicar un masaje Defibrilador para restaurar latido normal del corazón, probable paro respiratorio.
200 mA y mayores	Quemaduras severas - contracciones musculares severas; los músculos del pecho aprisionan el corazón y lo paran durante el choque (fibrilación ventricular prevenida). Paro respiratorio - el corazón puede latir después del choque, o puede se requerido el masaje cardiaco.

NACE RP-01-77 (2000), Tabla 4.

El límite superior de voltaje seguro AC de contacto es de cerca de 67 V. Éste es potencialmente alto para causar la fibrilación del corazón, si el cuerpo no se protege a través del aislamiento. Por motivo de seguridad, este nivel de voltaje se redujo a 15 V en

NACE RP-01-77 (2000) como el voltaje máximo permitido en la línea, y ahora generalmente se acepta como el voltaje de CA seguro de contacto permitido en una tubería.

1.7 CORROSION POR INDUCCION DE CA

Hasta el momento la mayoría de la atención ha sido para las consideraciones de seguridad de las personas con la HVAC, pero pueden existir también algunos problemas serios con la corrosión causada por la salida a tierra de CA inducida. La corrosión causada por la corriente alterna es ciertamente menos crítica que la experimentada por CC. Sin embargo, se han experimentado varios resultados de campo, y el tema ha sido absolutamente polémico.

Puesto que las condiciones en el punto de descarga en la superficie del metal se alternan entre oxidar y reducir con cada ciclo de voltaje, el grado de severidad de corrosión disminuye al aumentar la frecuencia.

El cobre sufre mucho menos daño que el acero. Los daños causados en los metales activo-pasivos, tales como acero inoxidable y aluminio, es mayor que los daños en los metales no-pasivos, tales como acero, cobre o cinc. La reducción y la oxidación que se alternan en las capas superficiales causadas por la CA pueden producir capas pasivas, porosas, y superficiales.

Los estudios realizados en la universidad de Illinois para la asociación americana del gas revelaron que la frecuencia baja (60Hz) de la CA aceleró la corrosión del acero bajo todas

las condiciones del suelo. El valor neto más alto de la corrosión era aproximadamente 2 milipulgadas por el año para una densidad corriente de 500 mA/in² en suelos neutrales. Aunque esta densidad corriente parece ser alta para una tubería bien-revestida, podría ocurrir en pequeños defectos en la capa.

Además, la presencia de CA en un circuito eléctrico que consiste en diversos metales, normalmente de acero y el magnesio, aumenta el grado de corrosión substancialmente. Por el grado normal de consumo del material del ánodo. La pérdida severa del metal se puede experimentar a ambos metales si la descarga de la corriente alterna se aumenta a aproximadamente 25 mA/in²

Es normal que para compensar los efectos de la corriente alterna en la tubería protegida catódicamente, se requiera un aumento en corriente de protección catódica para mantener el mismo nivel de protección. Por lo tanto, la vida útil de las camas de ánodos de sacrificio será reducida y el suministro de corriente de sistemas de corriente impresa se aumenta.

La corrosión causada por la descarga de CA tiene diferente aspecto que otros tipos de corrosión en suelos, como las producidas por las celdas galvánicas o de la corrosión biológica. La corrosión de la CA tiene un aspecto dendrítico, con pequeñas "montañas" en los centros de los hoyos.

La intensidad de la descarga de una tubería depende del voltaje de tubo-a-suelo. La descarga puede ocurrir para algunos cientos voltios en los defectos y los poros del revestimiento.

Si la CA inducida no se pone a tierra, Existen dos problemas serios de corrosión en la tubería Cuando ocurre la descarga a tierra:

- Interfiere con la aplicación de la protección catódica.
- A largo plazo, causa pérdidas serias en la pared del metal y puede causar fugas en la tubería.

1.8. CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA PROTECION DE CA INDUCIDA EN TUBERIAS

Según lo discutido anteriormente, los voltajes de CA Inducidos pueden representar riesgos de seguridad y de la integridad en tuberías enterradas. Afortunadamente, las investigaciones actuales sobre este el tema ha avanzado para la comprensión de este fenómeno. Recientemente, se ha creado un programa¹ para calcular inductancia de CA en tuberías.

Las investigaciones adicionales y las pruebas son necesarias para determinar más exactamente cómo el voltaje CA afecta las estructuras católicamente protegidas. Sin embargo, los resultados desde el punto de vista de seguridad están bien claros. El personal de operación y mantenimiento puede ser expuesto al choque eléctrico siempre que la CA inducida exceda el potencial de "Contacto", significa la diferencia de potencial que existe entre la mano y el pie; o el potencial de "paso", significa la diferencia potencial que existe entre ambos pies mientras que camina.

El cálculo del voltaje CA Inducido en tuberías enterradas depende de varias variables, a saber:

¹ PC-BASED de un proyecto de investigación por el PRC Internacional.

- Diámetro de la tubería instaladas
- Resistividad del terreno
- Resistencia, Rigidez dieléctrica y calidad del revestimiento
- Profundidad de la Tubería.
- Configuración de las fases del sistema de transmisión eléctrica
- Compensación entre el centro de la tubería y la línea central del sistema eléctrico de la transmisión
- Coeficiente del acoplador de la CA
- Desequilibrio eléctrico de las fases del sistema de la línea de transmisión
- Longitud del paralelismo.

El cálculo de las tensiones de CA inducida es relativamente complejo, usando el software, es posible predecir rápidamente los niveles de la CA, conociendo todas las variables. Una vez que se aproximen los niveles de voltaje, es posible idear medidas para la mitigación de potenciales de la CA y reducirlos a los niveles aceptables. Desde el punto de vista operacional y de seguridad, hay tres preocupaciones importantes que se necesitan ser tratadas individualmente:

- La Inducción durante la construcción y las pegas del tubo
- La condición de estado estacionario que existe una vez la tubería se construye y se comisiona.
- Estado transitorio que existe en el caso de un rayo o una falla de una fase.

Los resultados de los cálculos del estado transitorio son extremadamente importantes al seleccionar el dispositivo de mitigación. Aunque las cargas que ocurren durante condiciones de falla existen solamente para una corta duración, es precisamente este tipo de "picos" los que causan daños a la mayoría del equipo eléctrico. Diseñando el sistema

para manejar las corrientes de falla, se está seguro que el sistema seguirá siendo operacional y seguro, incluso después de una falla de la fase o la descarga de un relámpago.

Un punto digno de notar es la magnitud de la diferencia entre los estados estacionarios y transitorios.

1.8.1 Información requerida para el estudio de la mitigación de interferencia de la CA. Todos los datos requeridos pertenecen al sistema completo de las líneas de transmisión y de las tuberías que contribuyen, directamente o indirectamente, a los potenciales de la tubería dentro del derecho de vía bajo revisión.

Los Planos y documentos existentes del sistema en estudio deben contener la siguiente información de identificación:

- Número y fecha de la revisión
- Nombres de autores y de firmas
- Nombre de la organización que realiza el plano o documento.
- Nombre del proyecto y del título del documento.
- Se requiere el levantamiento de un mapa que proporciona una descripción del sistema de líneas tubería/transmisión bajo estudio, tal que se pueda identificar rápidamente lo siguiente:
 - Cruces de la línea de con la tubería hasta 300 metros de cualquier extremo del derecho de vía

- Líneas de transmisión siguiendo la ruta de la tubería, menos que un Km. de la tubería, para una distancia total de más de 150 metros, dentro de 30 Km. del extremo del derecho de vía en estudio o a lo largo del derecho de vía
- Localizaciones de todas las subestaciones y centrales eléctricas dentro de 150 metros de la tubería o conectada con él, a lo largo del derecho de vía y a 8 Km. de cualquier extremo del derecho de vía bajo estudio.
- Las localizaciones de todas las subestaciones y centrales eléctricas conectadas con las líneas de la transmisión enumeradas en los artículos de arriba, prestando especial atención a cada transformador de la subestación (y central eléctrica) que suministra una contribución significativa de la corriente de falla en estas líneas de la transmisión.
- Localizaciones de la transposición de la fase de las líneas de transmisión.
- Localizaciones de los puntos de mediciones realizadas de la resistividad del suelo. Marcar éstos con números del sitio.
- Secciones de la tubería a lo largo de la cual existe mitigación instalada: distinga entre áreas con sistemas de circuito sencillo y doble circuito.
- Números de postes o torres en el kilómetro.
- Localizaciones de las partes grandes de la tubería, tales como sitio de válvulas, estaciones de medición, lanzadores y receptores de marranos, etc. Las localizaciones de la estación de la prueba no se requieren en este mapa.
- Definir el alcance del estudio indicando los puntos inicio y los finales de las secciones de la tubería dentro de los derechos de vía.

Los datos requeridos del sistema eléctrico:

- Diagramas unifilares que demuestran distancias y interconexiones entre las subestaciones
- Contribuciones de la corriente de falla de los transformadores y corrientes que fluyen a lo largo de líneas de la transmisión, incluyendo el factor futuro del crecimiento, para las fallas monofásica a tierra que ocurren dentro del derecho de vía. Éstos se deben proveer en ángulo de los amperios, de la magnitud y de la fase, para las tres fases y todos los circuitos. Estos datos se deben proporcionar tabulados y en un diagrama Unifilar.
- Tiempos de despeje de fallas, detalles de las protecciones, relación inductancia / Resistencia
- Corrientes de la carga en amperios por el circuito (magnitud y ángulo), desequilibrio de la carga en por ciento. Incluye el factor futuro del crecimiento.
- resistencias de tierra de Torres/postes y especificación del diseño de la utilidad que pone a tierra torres/postes. Localizaciones de los conductores del contrapeso.
- Resistencias de tierra de la subestación y de la central eléctrica
- datos del conductor de la línea de transmisión (incluyendo cable de guarda): tipo de sección transversal y conductor. Marcación de las Fases.

1.9 DISPOSITIVOS PARA DESCARGA AC INDUCIDA EN TUBERIAS

1.9.1 Sistema de puesta a tierra. Se Pone a tierra la tubería para descargar la corriente CA inducida, y reducir el potencial en la línea. El tubo se puede Aterrizar conectando a tierra por medio de los ánodos del Zinc o del acero galvanizado, instalados en intervalos periódicos, esta solución ha sido muy utilizado en el pasado.

Usar los ánodos del Zinc para poner a tierra es eficaz, con tal que bastantes ánodos o barras de puesta a tierra estén instalados, y el sistema de tierra no se requiere para disipar corrientes de fallas y rayos. Cuando la resistividad del terreno disminuye con profundidad, se prefieren las barras profundas que los ánodos de zinc. Las barras profundas también son más convenientes de instalar después de la construcción. Como la corriente no se escapa fácilmente de una tubería bien cubierta, cuanto mejor es el revestimiento se requiere mejor puesta a tierra.

1.9.2 Celdas de polarización. Las celdas de polarización son dispositivos pasivos que actúan como interruptores de seguridad electroquímicos. La magnitud y la dirección del flujo actual a través de una celda de polarización dependen del campo electromagnético (EMF) aplicado a través de la celda. La celda consiste en pares múltiples de hojas de acero inoxidable sumergidas en una solución de hidróxido de potasio.

La corriente continua que fluye a través de una celda de polarización causa una película del gas en las placas, ofreciendo una alta resistencia a la corriente de baja tensión de CC. Mientras que el voltaje aplicado a través de las celdas aumenta, la corriente que la atraviesa también aumenta, haciendo que el espesor de la película del gas aumente. El voltaje de bloqueo de una celda de polarización está entre 1.2 y 1.7 V. Cuando se excede el umbral de tensión, la película comienza a desaparecer, y la resistencia de la celda disminuye rápidamente con los incrementos del voltaje aplicado. Los voltajes CA y voltajes de CC altos ven una celda de la polarización como "un corto circuito."

Al pasar corriente a través de una celda de polarización consume agua e hidróxido de potasio. También absorbe gradualmente el bióxido de carbono de la atmósfera. Las

celdas de polarización, por lo tanto, requieren mantenimiento periódico para comprobar los niveles de fluidos y mantener la concentración apropiada. El electrolito se debe cambiar periódicamente para asegurar la operación apropiada, como sigue:

- Cada cuatro años, si la experiencia demuestra que se requieren chequeos anuales
- Cada año, si se requieren los cheques mensuales.

Además, la fuerte solución cáustica en la celda se puede derramar por la caída de un relámpago o corrientes de falla, y éstos deben ser inmediatamente reportado cuando el producto químico se derrama.

1.9.3 Bloqueo de estado sólido de la corriente continua. Actualmente, los dispositivos de estado sólido disponibles tienen varias ventajas sobre las celdas de polarización. Por ejemplo, tienen las ventajas de no tener mantenimiento, y derrames de químicos asociados a las celdas de la polarización.

Por otra parte, el uso de dispositivos de estado sólido da un rango de operación mucho más ancho, especialmente al voltaje de bloqueo de la CC. Mientras que las celdas de la polarización tienen un voltaje de bloqueo de la CC de 1.2 a 1.7 V, el dispositivo de estado sólido puede tener el voltaje de bloqueo fijado independientemente a cualquier nivel. Se selecciona generalmente un nivel de bloqueo de 10 V para prevenir la pérdida de corriente de la CC de la estructura protegida catódicamente, y para evitar que la corriente perdida de CC tenga acceso a la estructura catódicamente protegida. Por ejemplo, los sistemas de transporte masivo de tránsito rápido, son una fuente común de interferencia de CC, y tienen voltajes mayores que 1.7 V que bloquean las celdas de la polarización.

La capacidad de los dispositivos de estado sólido se extiende desde 3.7 a 15 KA, dándole mayor capacidad de corriente de falla, que los 5 kA de las celdas de polarización que substituyen. Un dispositivo de 3.7 kA se utiliza en áreas de capacidad limitada de corriente alterna de falla. El rango de duración de la corriente es de 30 ciclos, mientras que la mayoría de las corrientes de falla se limitan a 6 a 10 ciclos.

El grado del voltaje de bloqueo de la CC se basa en medidas de campo de la corriente máxima de CC para el sistema. Las características de funcionamiento del dispositivo de estado sólido, fija el voltaje de bloqueo máximo permitido de CC que se puede poner en el sistema.

1.9.4 Descargadores de rayos y varistores de oxido de metal. Los descargadores de rayos y varistores de oxido de metal pueden usarse entre la tubería y al otro lado de las juntas aisladas de los gasoductos. Sin embargo, su uso tiene una restricción, es que tiene que desarrollarse antes una diferencia potencial para que el descargador conduzca. Con ciertos tipos de descargadores, este potencial relativamente alto podría ser peligroso para las personas que se pongan en contacto con el descargador. Los Descargadores deben estar conectados con la tubería por cables suficientemente dimensionados. La resistencia a tierra en donde se conecta el descargador debe ser siempre baja y segura. Se debe instalar cerca de la tubería siendo protegido y tener un camino al suelo corto y directo. Debe ser instalado un interruptor del circuito bien dimensionado para permitir el aislamiento del dispositivo de aterrizaje durante pruebas o el mantenimiento.

1.9.5 Discriminadores de corriente CA-CC. Los Discriminadores de corriente CA-CC son dispositivos del estado sólido con las mismas aplicaciones que las celdas de Polarización pero con varias ventajas:

- No tiene resistencia eléctrica al paso de corriente alterna.
- Las Células de la Polarización necesitan el mantenimiento porque la solución de hidróxido de potasio se consume, como todos los electrolitos, y mientras el discriminador AC-DC no tiene un electrolito y no necesita su recambio y mantenimiento.
- Para pasar el voltaje del umbral de bloqueo de las Celdas de Polarización es necesario más de 1 V, y si queremos que este umbral sea mayor se han de instalar varias en serie. El paso sin resistencia, o con muy poca resistencia, con la Celdas de la Polarización es de 1,7 V, sin embargo con el Discriminador CA-CC se puede fijar (en la fabricación) el umbral entre 2,5 V a 20 V.
- Las Celdas de Polarización Kira (disponibles en el mercado) sólo tiene tres tamaños, para corriente de choque 5 kA, 25 kA y 50 kA, mientras que los Discriminadores AC-DC tienen rangos de 5 kA, 10 kA, 20 kA, 30 kA, 40 kA, 50 kA, 60 kA, 75 kA, 85kA y 100 kA. Con Celdas de polarización, si se quieren conseguir protección para corrientes de choque mayores se deben poner varias en paralelo.

La protección que ofrece el Discriminador de Corriente AC-DC se puede utilizar para:

- Defectos de corriente alterna (desde 5 kA hasta 100 kA)
- Corrientes de rayo (100 kA)
- Corrientes de alterna inducidas
- Corrientes conducidas provenientes de defectos a tierra de líneas de alta tensión.
- Conexión entre dos sistemas de tierra evitando el par galvánico, o bien cuando uno lleva un sistema de protección catódica y el otro no.

Si se tienen, por ejemplo, 2 sistemas de puesta a tierra diferentes, y se deben tener aislados para no afectar al sistema de protección catódica de uno de ellos, y sin embargo se quiere que estén en contacto cuando hay una sobretensión por encima de 2,5 V o una descarga de corriente alterna la solución del problema puede ser instalar un discriminador CA-CC entre los dos sistemas de puesta a tierra.

2. PROBLEMAS CREADOS POR LOS RAYOS EN LAS TUBERIAS DE FLUJO

2.1 FORMACION DEL RAYO

El Rayo es la descarga de partículas cargadas entre la tierra y las nubes, o entre nubes. La mayoría de los rayos nube-tierra se inician por el fuerte campo eléctrico que existe en la carga positiva situada debajo de la nube y la carga negativa de la base de la nube. Una vez que la nube de tormenta se ha cargado hasta el punto en que el campo eléctrico excede la rigidez dieléctrica local de la atmósfera, es decir, la capacidad de la atmósfera de mantener una separación de cargas eléctricas, el resultado es la iniciación de una descarga eléctrica atmosférica o rayo. En ese instante, el campo eléctrico es del orden de un millón de voltios por metro; en menos de un segundo, el rayo transportará la carga correspondiente a miles de electrones y proporcionará una potencia eléctrica equivalente a 100 millones de bombillos de alumbrado residencial. Durante esa fracción de segundo, la energía electrostática de la carga acumulada pasa a energía electromagnética², energía acústica³ y, finalmente, calor. No se conoce exactamente el proceso físico mediante el cual la carga almacenada en la nube de tormenta se transfiere a la tierra en forma de rayo. Existe varias teorías que tratan de explicar las diferentes etapas de una descarga, pero hasta ahora no existe una teoría única y comprobada con la que estén de acuerdo todos los investigadores, pero la mayoría están de acuerdo que la descarga sigue una trayectoria del aire ionizado por los rayos cósmicos, dando al relámpago su aspecto dentado bien conocido. La amplitud de la corriente del rayo esta en el rango de 1.000 a

² El Relámpago visible.

³ El trueno audible

200.000 Amperios. La descarga total de la corriente toma de 50 a 100 μ s (microsegundos), para descargas simples. Típicamente, se producen descargas múltiples que aumentan el tiempo de descarga.

2.2. NORMAS SOBRE PROTECCION CONTRA RAYOS

La protección contra rayos es un asunto de primordial importancia para la seguridad de los seres vivos y el adecuado funcionamiento de los dispositivos, equipos y sistemas eléctricos y electrónicos. Los sistemas y medios de protección deben, entonces, proteger físicamente a las personas, reducir el riesgo de fuego y evitar la degradación de los dispositivos y equipos y las interrupciones en la producción, a niveles tolerables. Para llenar estos requerimientos y evitar acciones legales, incluyendo demandas por pérdidas económicas, las normas de protección contra rayos deben estar basadas en principios científicos probados y argumentos técnicos incuestionables.

Alrededor de 16 países del mundo, incluido Colombia, han desarrollado normas de protección contra rayos, las cuales, en su mayoría, tienen como base la Norma Internacional IEC 61024.

La norma técnica Colombiana NTC de protección contra rayos 4552 fue desarrollada durante cuatro años (1994-1999) por ingenieros e investigadores de todo el país, convocados por ICONTEC, puesta a consulta pública durante tres meses, evaluada por el Comité Técnico Colombiano y aprobada por el Consejo Directivo de ICONTEC en Septiembre de 1999, para su publicación como Norma Técnica Colombiana sobre

Protección contra Rayos, - NTC 4552. Actualmente el Comité de la Norma trabaja en su revisión.

La NTC 4552 establece las medidas que se deben adoptar para lograr la protección eficaz contra los riesgos asociados a la exposición directa o indirecta de personas, animales, equipos y el entorno a las descargas eléctricas atmosféricas.

La NTC 4552 cubre los requisitos de protección contra descargas eléctricas atmosféricas para:

- Estructuras de uso común (oficinas, viviendas, iglesias, colegios, hospitales, etc.).
- Estructuras utilizadas para la prestación de servicios públicos de comunicaciones y de acueducto, (aplica para gasoductos).

Esta norma no cubre los requisitos de protección contra descargas eléctricas atmosféricas de los sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica.

2.3 EFECTOS DE LAS CAIDAS DE RAYOS

Cuando cae un rayo en una parte de la tubería, como cruces aéreos, válvulas, etc. (descarga directa), o a una estructura o objeto (p Ej. árboles) cercano (descarga indirecta) se produce efectos similares a los causados por las fallas de corriente alterna. Al caer en una torre de la transmisión, un cono del voltaje se crea alrededor del sistema de puesta a tierra de la torre que puede afectar una tubería dentro del cono. La capa externa de la tubería tendrá inicialmente el potencial de la tierra, y la corriente fluirá a

través de los defectos del revestimiento del tubo, creando un arco que pueda dañar seriamente la tubería.

Con el dispositivo de puesta a tierra de estado sólido en su lugar, la tubería se pone en cortocircuito con el sistema de tierra de la torre. El espaciamiento de los dispositivos de estado sólido está determinado por la capacidad de la tubería de llevar la corriente del rayo al sistema de puesta a tierra a través de los dispositivos.

Las sobretensiones que aparecen como consecuencia de una tormenta tienen dos posibles causas: descarga directa/cercana de rayo ó descarga lejana de rayo.

Las descargas directas o cercanas de rayo son las que se producen en la instalación de pararrayos de protección de algún equipo, en su cercanía inmediata o en alguno de los sistemas eléctricos conductores que penetran en el mismo (por ejemplo: alimentación de corriente de rectificadores, cables de control). Las corrientes y tensiones de choque que se producen a causa de la descarga directa de rayo representan una amenaza muy seria para el sistema que se pretende proteger, en cuanto a su amplitud y contenido de energía. En caso de una descarga directa o cercana de rayo se originan las sobretensiones por la caída de tensión en la resistencia de toma de tierra de choque, y el aumento de potencial resultante en el edificio en comparación con el entorno lejano. Esto constituye el máximo esfuerzo a que se ven sometidas las instalaciones eléctricas

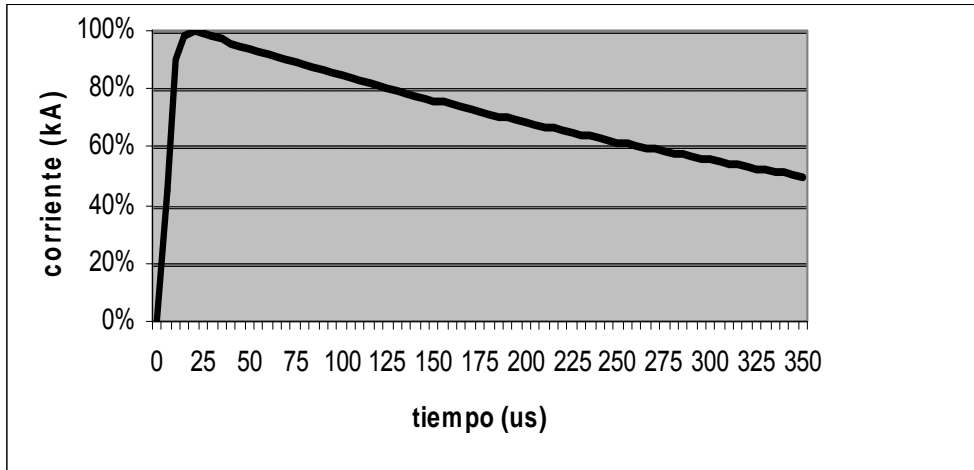
La norma IEC 61024 se refiere a la protección de estructuras contra impactos directos de rayos, y ofrece una clara directiva para definir una forma de onda que describa la energía verdadera que puede penetrar a una instalación debido a estos efectos. La forma de la

onda de corriente de choque 10/350 μ s (Figura 3) cuenta con un tiempo de ascenso rápido con un relativo largo tiempo de cola. Para una corriente de 50 kA aumentará a 90% de su valor pico (45 kA) en 10 μ s y cae a la mitad de su valor (25 kA) en 350 μ s. Además del incremento de tensión en la resistencia de puesta a tierra por la corriente de choque se producen sobretensiones en la instalación eléctrica de los sistemas y aparatos conectados a ella a causa del efecto de inducción del campo electromagnético del rayo. La energía de estas sobretensiones inducidas y las corrientes de impulso resultantes de las mismas son bastante más bajas que la corriente de choque de rayo en caso de descarga directa, y por eso se describe esta energía con la onda de corriente de choque 8/20 μ s (Figura 3). Esto significa que para una magnitud de corriente de 10 kA aumentará al 90% de su valor pico (9.0 kA) en 8 μ s y luego caerá a un valor medio (5 kA) en 20 μ s.

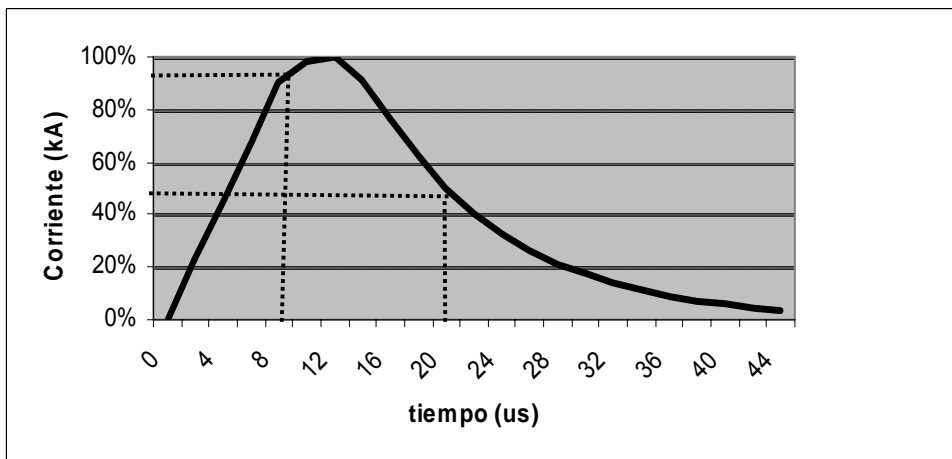
Los aparatos y componentes que no tienen que soportar corrientes ocasionadas por descargas directas de rayo se verifican con corrientes de choque 8/20 μ s.

Descargas lejanas de rayo son aquellas descargas de rayo que tienen lugar a gran distancia de la instalación objeto de protección: descargas de rayo en la red aérea de media tensión o respectivamente en su proximidad inmediata o también descargas de rayo de nube a nube. Análogamente a las sobretensiones inducidas, las repercusiones de las descargas lejanas de rayo sobre la instalación eléctrica de un edificio se neutralizan mediante componentes dimensionados de acuerdo con la onda de corriente de choque 8/20 μ s.

Figura 3. Ondas de corriente de choque de 10/350 μ s y 8/20 μ s



1. Corriente de choque de prueba para descargadores de corriente de rayo.



2. Corriente de choque de prueba para descargadores de sobretensiones.

2.4 FILOSOFIA DE PROTECCION

Para garantizar la disponibilidad permanente de sistemas técnicos de energía y comunicación muy complejos (SCADA), incluso en caso de influencia directa de rayo, es necesario adoptar otras medidas complementarias de protección contra sobretensiones

en sistemas electrónicos y eléctricos, que van más allá de la instalación de pararrayos de protección de la estructura ó de la edificación. Es fundamental aquí tomar en consideración todas las causas posibles de sobretensiones. Para ello se aplica el concepto de zonas de protección contra el rayo que se describe en la norma IEC 61312-1. Se procede en este caso a dividir la edificación en zonas de distinto riesgo. Basándose en estas zonas se puede decidir entonces cuales son los aparatos y componentes de protección contra rayos y sobretensiones que se han de utilizar. En un concepto de zonas de protección contra rayos apropiado para la compatibilidad electromagnética se incluye la protección externa contra rayos (con dispositivos captadores, derivadores y toma de tierra), la compensación de potencial, el blindaje de los locales y la protección contra sobretensiones para el sistema técnico de energía e información. Para la definición de las zonas de protección contra rayos se hará uso de las características que se exponen en la tabla 2.

De acuerdo con la capacidad de descarga y nivel de protección aportado así como la ubicación de los mismos, estos dispositivos se dividen en descargadores de corriente de rayo, descargadores de sobretensiones y descargadores Combinados o Integrados.

Tabla 2. Definición de las zonas de protección contra el rayo

zona de protección	Descripción
O _A	Zona en la que los objetos, están expuestos a la descarga directa de rayo y por lo tanto tiene que poder conducir toda la corriente de rayo. Aquí aparece el campo electromagnético no atenuado.
O _B	Zona en la que los objetos no están expuestos a la descarga directa de rayo, aquí aparece el campo electromagnético no atenuado.
1	Zona en la que los objetos no están expuestos a la descarga directa de rayo y las corrientes de rayo son muy reducidas en comparación con la zona O _A . En esta zona y en base alas medidas de blindaje adoptadas puede estar atenuado el campo electromagnético.
2	Si se hace necesaria una posterior reducción de las corrientes conducidas por los cables y/o del campo electromagnético, habla que establecer zonas de protección consecutivas. Las exigencias que se plantean a estas zonas tiene que estar orientadas a las características de las zona de entorno que se desea proteger

Las máximas exigencias de descarga se plantean a los descargadores de corriente de rayo y a los descargadores Combinados, por estar en la transición de la zona de protección contra rayos O_A hacia la zona 1 o respectivamente 2. Estos descargadores tienen que ser capaces de poder conducir varias veces, sin resultar destruidos, corrientes parciales de rayo de la forma de onda 10/350 μ s, evitando de esta manera la penetración de las mismas en la instalación eléctrica de un edificio ó equipo. En la transición de la zona de protección contra rayos O_B hacia la zona 1 o en la transición de las zonas de protección contra rayos 1 y 2 o superiores se instalan descargadores de sobretensiones.

La misión de protección es, tanto atenuar las magnitudes residuales de las etapas de protección antepuestas, como también limitar las sobretensiones inducidas en la instalación o generadas en la misma. Las medidas arriba descritas para protección contra rayos y sobretensiones en los límites de las zonas de protección contra rayos tienen la misma validez y se aplican igualmente para los sistemas técnicos de información y energía. Con estas medidas, adecuadas a la compatibilidad electromagnética, descritas a partir del concepto de zonas de protección contra rayos puede conseguirse la disponibilidad permanente de una instalación eléctrica con una infraestructura moderna.

2.5 SISTEMA INTEGRAL DE PROTECCION CONTRA RAYOS

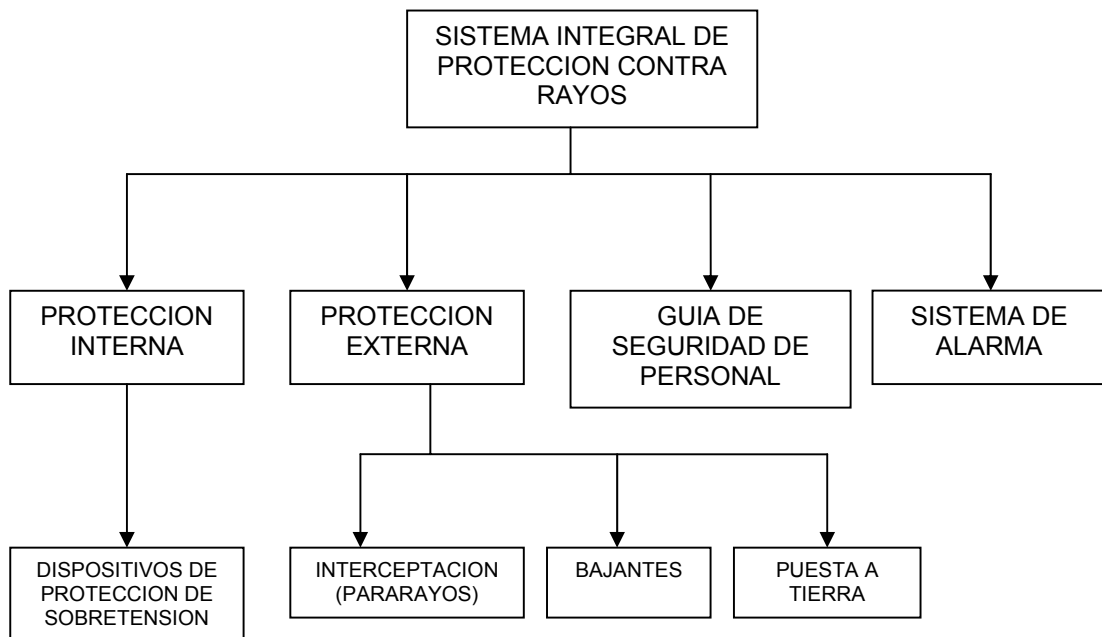
Respecto a los rayos se puede afirmar, sin lugar a dudas, que no existen medios para evitarlos pero existen medidas para ejercer un control que ofrezca seguridad a las personas y a los equipos eléctricos y electrónicos. Por tanto las precauciones de protección apuntan hacia los efectos secundarios y a las consecuencias de una descarga eléctrica atmosférica.

En la Figura 4 se presenta esquemáticamente el Sistema Integral de Protección contra Rayos (SIPR), que debe ser utilizado en Colombia.

Como se aprecia, el sistema de puesta a tierra es una parte fundamental del sistema de protección contra rayos; dentro de la protección externa su propósito es hacer posible la descarga y dispersión de las elevadas corrientes del rayo hacia la tierra a través de un elemento conductor enterrado en el suelo, sin causar sobretensiones peligrosas tanto para las personas como para los equipos. La protección interna sirve como referencia de

tensión para los equipos y para disipar las corrientes de sobretensiones, derivadas por los dispositivos de protección fina.

Figura 4. Elementos del sistema integral de protección contra rayos



2.6 METODOLOGIA PARA IMPLEMENTAR EL SISTEMA INTEGRAL DE PROTECCION CONTRA RAYOS EN ESTRUCTURAS

Las medidas de protección para una estructura o un conjunto de estructuras se enfocan hacia los efectos directos e indirectos de los impactos cercanos de rayos. Los efectos directos se refieren a la corriente del rayo que impacta en el sistema de interceptación y los indirectos a las tensiones inducidas dentro de la instalación debidas a la variación de corriente del rayo. A partir de esto, aunque ninguna protección contra rayos es cien por

cien confiable, puede alcanzarse un alto grado de seguridad si se concibe el sistema de protección contra rayos mediante la combinación de varios elementos:

- Protección externa
- Protección interna
- Sistema de puesta tierra
- Guía de seguridad de personal

Para realizar el estudio de protección contra rayos se debe partir de la caracterización espacial del sitio en estudio, para así tener en cuenta las condiciones de aleatoriedad, propias de cualquier fenómeno meteorológico. A partir de la caracterización espacial de la estructura se realiza la evaluación del riesgo de daño por rayos.

Con base en la teoría del método electrogeométrico se hace el diseño de protecciones externas contra rayos y luego se estudian los lineamientos generales para establecer las protecciones internas de equipo eléctrico y electrónico, susceptibles de daños por rayos.

2.7 EVALUACION DEL FACTOR DE RIESGO PARA PROTECCION CONTRA RAYOS

El propósito de la evaluación del factor de riesgo es establecer la necesidad de utilizar un sistema de protección contra rayos en una estructura dada y determinar si este sistema debe ser integral.

La evaluación del riesgo es el elemento más importante en el procedimiento para diseñar un sistema de protección contra rayos y especialmente en el procedimiento de selección

del nivel de protección. Por ello el método de evaluación debe ser efectivo y relativamente simple.

Para encontrar el nivel de riesgo se tienen en cuenta cuatro índices, clasificados y ponderados dentro de dos características como son los parámetros de los rayos e índices que están relacionados con la estructura.

Los parámetros de las descargas eléctricas atmosféricas utilizados para encontrar el nivel de riesgo son: La Densidad de Descargas a Tierra (DDT), y la Corriente Pico Absoluta Promedio (I_{abs}) expresada en kiloamperios, asignando una mayor relevancia a la primera de éstas, debido a que existe mayor probabilidad de que una estructura se vea afectada dependiendo de la cantidad de descargas a la que está expuesta, que de la intensidad de las mismas. Por esta razón se toman proporciones de 0,7 para la DDT y 0,3 para la I_{abs} , obteniendo la siguiente expresión:

$$\text{Riesgo} = 0,7 * R_{DDT} + 0,3 * R_{I_{abs}} \quad (1)$$

Siendo R_{DDT} el aporte al riesgo debido a la densidad de descargas a tierra y $R_{I_{abs}}$ el aporte al riesgo ocasionado por la magnitud de la corriente pico absoluta promedio.

Los valores de I_{abs} y de DDT deben tener el 50 % de probabilidad de ocurrencia, o menos, a partir de datos multianuales. Además se debe tomar un área de 9 km² (3 Km. x 3 Km.) o menos, teniendo en cuenta la exactitud en la localización y la exactitud en la estimación de la corriente pico de retorno del sistema de localización de rayos.

Al encontrar la densidad de descargas a tierra con sistemas de localización confiables, implícitamente se considera la orografía del área, es decir, montaña, ladera, plano, etc. y la latitud.

Tabla 3. Índice de riesgo por rayos

Densidad de descargas a tierra [Descargas/km ² - año]		Corriente pico absoluta promedio [kA]		
		$40 \leq I_{abs}$	$20 \leq I_{abs} < 40$	$I_{abs} < 20$
	$R_{I_{abs}}$	1	0.65	0.30
	RDDT			
$30 \leq DDT$	1	1.000	0.895	0.790
$15 \leq DDT < 30$	0.75	0.825	0.720	0.615
$5 \leq DDT < 15$	0.50	0.650	0.545	0.440
$DDT < 5$	0.25	0.475	0.370	0.265

Tabla 4. Valores del índice relacionado con el uso de la estructura

Clasificación de estructuras	Uso de la estructura	VALOR DEL ÍNDICE
Estructuras de uso común	Teatros, colegios, escuelas, iglesias, supermercados, centros comerciales, áreas deportivas, hospitales, prisiones, ancianatos, jardines infantiles, guarderías, hoteles.	40
	Oficinas y viviendas de tipo urbano y rural	30
	Bancos, compañías aseguradoras, industrias, museos, bibliotecas, sitios históricos y arqueológicos	20
Estructuras utilizadas para la prestación de servicios públicos	Estructuras de comunicaciones, instalaciones para acueducto.	10

Tabla 5. Valores del índice relacionado con el tipo de estructura

TIPO DE ESTRUCTURA	VALOR DEL ÍNDICE
No metálica	40
Mixta	20
Metálica	0

Tabla 6. Valores del índice relacionado con la altura y el área de la estructura

ALTURA Y ÁREA DE LA ESTRUCTURA	VALOR DEL ÍNDICE
Área menor a 900 m².	
Altura menor a 25 m	5
Altura mayor o igual a 25 m	20
Área mayor o igual a 900 m².	
Altura menor a 25 m	10
Altura mayor o igual a 25 m	20

El ingeniero encargado de la evaluación del factor de riesgo para protección contra rayos, debe tomar en consideración la influencia de estructuras adyacentes o cercanas a la evaluada.

Sumando los valores de los índices relacionados con la estructura, como son el uso, el tipo y la combinación de altura y área, de acuerdo con las tablas 4, 5 y 6 se obtiene la gravedad que se puede presentar en la estructura.

Las estructuras que obtengan valores superiores a 80 presentan una gravedad severa, las que obtengan entre 66 y 80 se identifican como de gravedad alta, las que obtengan entre 51 y 65 como de gravedad moderada, las que obtengan entre 36 y 50 como de gravedad baja y las menores a 36 se consideran de gravedad leve. Esto se puede apreciar en la tabla 7.

Tabla 7. Niveles de Gravedad

SUMA DE ÍNDICES DE GRAVEDAD	GRAVEDAD
0 a 35	Leve
36 a 50	Baja
51 a 65	Moderada
66 a 80	Alta
81 a 100	Severa

Luego de esto se plantea la matriz del factor de riesgo, teniendo en cuenta el índice de Riesgo de la zona y la gravedad según el tipo de estructura, con ello se obtiene:

Tabla 8 Factor de riesgo

GRAVEDAD	Severa	Alta	Moderada	Baja	Leve
Índice de Riesgo					
Severos					
Altos					
Moderados					
Bajos					

	SEVERO
	ALTO
	BAJO

El factor de riesgo es una herramienta que le indica al diseñador de una protección la magnitud del riesgo debido a rayos a que esta expuesta una instalación, sus ocupantes y

los equipos que se encuentre en el sitio evaluado. En cualquier caso es responsabilidad del diseñador realizar las especificaciones de la instalación para una segura protección contra rayos; sin embargo se dan las siguientes recomendaciones:

- Si el factor de riesgo es alto, se recomienda un diseño e instalación tanto de protecciones externas como Internas.
- Si el factor de riesgo es severo, significa que la frecuencia de los rayos (densidad de descargas a tierra) y la magnitud de la corriente de retorno del rayo en el sitio evaluado son muy altas y requieren además de un juicioso diseño de protección externa e interna un mantenimiento dedicado de la instalación especialmente en épocas de alta actividad de rayos.
- Si el factor de riesgo es bajo no se requiere protección externa pero se debe instalar protección interna con su correspondiente diseño de puesta a tierra.

El sistema de alarma se requiere en sitios abiertos como plantas de proceso, estadios de fútbol, canchas de golf, centros recreacionales al aire libre o similares, donde el factor de riesgo sea alto o severo.

En cualquier caso se debe difundir una guía de seguridad personal específica para el sitio por proteger.

3. SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS PARA MITIGAR EFECTOS DE AC Y DE CAIDA DE RAYOS EN LINEAS DE FLUJO DE BP EN CASANARE

3.1 SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS DE PROTECION CONTRA CA INDUCIDA EN LINEAS DE FLUJO DE BP

La principal fuente de tensión de CA inducida en las líneas de flujo de son las corrientes de falla en las subestaciones de los CPF's.

Para las tuberías de las líneas de flujo de BP, la corriente de la salida de la CC fue seleccionada para ser 0.1mA, dando por resultado un voltaje de bloqueo de dos voltios. Si se utiliza una celda de polarización, la corriente de la salida de una celda de la polarización es cerca de 50 A en 2 V. Para reducir la corriente de la salida a 0.1mA a través de una celda de polarización se requeriría un voltaje máximo de solamente 0.15 V a través de la celda.

Por las ventajas anteriormente mencionadas se selecciona el "discriminador de corriente CA- CC" marca WWI PROCAT, modelo WI-AC-DC-33.

Estas de ubicaran en las bridas aisladas ubicadas a la entrada en los CPF's.

Descripción y características del dispositivo:

- El dispositivo se construye dentro de una caja o armario con grado de protección IP-65 Tamaño 500 mm x 300 x 270 mm y peso aproximado 15 Kg.
- Los conectores son de acero inoxidable.
- Incluye una vía de chispas para protección para las corrientes de rayo de 100 KA.
- Temperatura de funcionamiento ambiente: -40°C a + 65°C.

- Umbral de bloqueo de voltaje: 2.4 V
- Corriente de choque a 60 HZ: 35 KA para el primer ciclo.

Forma de Instalación:

El Discriminador de corriente CA-CC bloquea la corriente continua de una forma asimétrica. El terminal negativo (marcado como -) debe conectarse a la estructura protegida catódicamente, es decir la tubería subterránea, y el terminal positivo (marcado +) a la puesta a tierra o al otro lado de la junta aislante, es decir a la estructura conectada a tierra y no protegida catódicamente.

Para evitar una caída de tensión importante entre las dos conexiones, los cables de conexión a estas deben ser lo más cortos posibles, pudiendo haber caídas de tensión hasta de 10.000 V/m. Se recomienda que las conexiones a las estructuras sean mediante soldadura (por ejemplo soldadura exotérmica).

3.2. SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS DE PROTECCION CONTRA DESCARGAS ATMOSFERICAS EN LINEAS DE FLUJO DE BP EN CASANARE

3.2.1 Evaluación del factor de riesgo del rectificador CPR-001 del CPF de Cupiagua. A continuación se presenta una aplicación real para establecer la necesidad de utilizar un sistema integral de protección contra rayos en el rectificador de protección catódica ubicado en el CPF de Cupiagua, Municipio de Aguazul- Casanare, aplicando la norma NTC 4552

- Determinación de la densidad de rayos a tierra. Se calcula según la NTC como:

$DDT = (0.1 + 0.35 \cdot \sin(\delta)) \cdot 0.6 \cdot NC$, donde δ es la latitud y NC el nivel ceraúnico.

La latitud de Cupiagua es $5^\circ 13.113'$ y el Nivel ceraúnico es 120 (Ver Anexo A), por lo tanto $DDT = 14.84$ rayos por Km^2 -Año.

- Determinación de la corriente pico absoluta promedio. La determinación de esta variable se hizo utilizando la distribución de frecuencia acumulada de amplitudes de corriente de rayo según el comité CIGRE⁴ 1979.

De acuerdo con resultados de investigaciones se ha planteado la hipótesis que en países tropicales, como Colombia, se pueden esperar valores de parámetros de rayo superiores a los de otras latitudes. Es por ello que en Colombia se recomienda utilizar para diseños de protección contra rayos, valores de parámetros de rayo con baja probabilidad de ser superados.

Teniendo en cuenta la recomendación de la norma se hizo un análisis para diferentes valores de probabilidad de corriente pico, buscando encontrar un rango de valores para el riesgo, entre un 20 y un 50 % de probabilidad.

PROBABILIDAD	CORRIENTE PICO (kA)
50%	30 kA
20%	50 kA

Según los parámetros del rayo el índice de riesgo es moderado

⁴ Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas

- Determinación del Índice de Riesgo por Rayos. Valores del índice relacionado con el uso de la estructura: Por el uso que se le da a la estructura en estudio se le asignó el valor máximo (40), que corresponde a una estructura de uso común en donde puede haber un gran número de personas.
- Valor del índice relacionado con el tipo de estructura. Por el material con el cual esta construida la estructura (Acero y Concreto), la clasificamos como Mixta que tiene un valor asignado de (20).
- Valores del índice relacionado con la altura y el área de la estructura. Teniendo en cuenta la influencia de estructuras adyacentes al rectificador, se le da a este índice el valor de (10) por tener un área mayor de 900 m² y altura menor de 25 m.

Sumando los índices relacionados con la estructura (70), se obtiene la gravedad que se puede presentar en la estructura.

Suma de índices de Gravedad	Gravedad
0 a 35	Leve
36 a 50	Baja
51 a 65	Moderada
66 a 80	Alta
81 a 100	Severa

Teniendo el nivel debido a los parámetros del rayo y el nivel de gravedad debido a las características de la estructura se establece el factor de riesgo en la matriz del factor de riesgo:

GRAVEDAD PARAMETROS	SEVERA	ALTA	MODERADA	BAJA	LEVE
SEVEROS					
ALTO					
MODERADO					
BAJO					

	SEVERO
	ALTO
	BAJO

Según la norma técnica colombiana NTC-4552 para un factor de riesgo alto se debe instalar protección externa y protección interna.

3.2.2 Cálculos de sobretensiones inducidas. Para el cálculo de sobretensiones inducidas por descargas atmosféricas, se considerarán los dos casos: Impacto cercano e Impacto directo

El rectificador estará sometido a dichas sobretensiones, y que por lo tanto deben ser protegidos internamente.

- Sobretensión debido a descargas eléctricas indirectas (Cercanas). Estas se pueden estimar a través de la siguiente ecuación:

$$U = \mu_0 * S_{lb} * H_m / T_l \quad (2)$$

Con $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} (V*s/A*m)$

S_{lb} es el área del lazo cerrado que forma el equipo a proteger.

H_m la intensidad de campo magnético de la estructura, que de acuerdo a parámetros de la norma IEC, para una Clase de protección I (eficiencia del 98%) es del orden de los 32 KA/m para la primera descarga de retorno.

T_1 es el tiempo de frente de la corriente del rayo, que para el caso se ha elegido de una onda que tiene 10 μ s de frente.

El rectificador se encuentra conectado a un tablero eléctrico ubicado a 12 m y en una base con un aproximado ancho de 1m.

La sobretensión será igual a:

$$U = 4\pi * 10^{-7} * 12m^2 * 3.2 \text{ KA/m} * 10\mu s$$

$$U = 4.83 \text{ Kv}$$

- Sobretensiones inducidas por impacto directo. Las sobretensiones inducidas por acoples magnéticos causados por impactos directos de rayos pueden ser estimados por:

$$U = \frac{\mu_0 * I_l}{40 * T_1} * l * \ln\left(\frac{d + b}{d}\right) \quad (3)$$

Con d como la distancia del pararrayos más cercano al rectificador, l y b las dimensiones del lazo definido, I_l la corriente del rayo en KA, que para el tipo de protección Clase I es de 200 y los restantes son parámetros descritos anteriormente.

$$U = (4\pi * 10^{-7} * 200 \text{ KA} / 40 * 10\mu s) * 2m * \ln(25/15)$$

$$U = 641,42 \text{ v}$$

- Protección externa. Sistema de interceptación de rayos:

El rectificador posee en la actualidad en cercanías varios pararrayos instalados en mástiles y postes de alumbrado.

Los dispositivos de interceptación de rayos deben ser varillas sólidas tubulares en forma de bayoneta, con una altura por encima de las partes altas de la estructura.

Bajantes:

El objeto de las bajantes es derivar la corriente del rayo que impacta en las puntas de captación

Sistema de puesta a tierra:

El sistema total de puesta a tierra es una parte fundamental del sistema de protección contra rayos que contribuye a la seguridad de personal y de los equipos en caso de la incidencia de una descarga, puesto que provee una solución equipotencial a los equipos.

- El CPF de Cupiagua cuenta con un sistema de puesta a tierra, compuesta por una malla universal al que está conectado el rectificador y las partes metálicas de estructuras no portadoras de corriente, para evitar efectos debidos a un impacto directo a la estructura y para ofrecer un camino de baja resistencia para la corriente del rayo.

Las instalación eléctrica, de la estructura cumple con todos los requerimientos técnicos, existen barrajes equipotenciales con los cuales se obtienen un potencial común, y se logra que las instalaciones se eleven al mismo potencial, evitando peligrosas diferencias de potencial.

- Protección interna. Cubre efectos secundarios provocados por la caída directa o indirecta de un rayo a la estructura. Por efecto de inducción o la conducción, estas

pueden ocasionar sobretensiones peligrosas para las personas, las estructuras y los equipos.

La capacidad de supervivencia de las protecciones depende del tamaño del transitorio. Este a su vez depende de la localización de la protección, pues debido a la impedancia de los cables y división de corrientes, la señal transitoria se atenúa a medida que viaja dentro de una instalación. La Norma ANSI - IEEE C62.41 considera tres categorías de localización:

- Categoría C. Definida como:

- Fuera de la edificación, o
- Al lado de la alimentación principal, entrando al tablero de distribución de baja tensión,
- Al lado de carga de un tablero de distribución que alimenta otra edificación o a un equipo en el sitio.

- Categoría B. Definida como:

- En el sistema de distribución, entre el lado de carga del tablero principal y una toma, o
- Dentro de aparatos que no están alimentados desde una toma de pared, o
- Tableros de distribución localizados dentro de una distancia de 20 metros de un cable en Categoría C, o
- Equipos conectados o protegidos localizados dentro de una distancia de 20 metros de un cable en Categoría C.

- Categoría A. Definida como:

o Equipos conectados o protegidos a más de 20 metros de un cable en Categoría C.

Las sobretensiones sobre redes de datos no son atenuadas significativamente por el cable, por tanto las protecciones deben estar siempre referidas a la localización Categoría C. Sin tener en cuenta donde están ellos instalados en la edificación, el peor caso será similar. Esto está basado sobre la base de una forma de onda transitoria de 10/700 μ s.

Según la ANSI - IEEE C62.41-1991 los valores recomendados de protección, de acuerdo con la Categoría de localización y forma de onda se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Valores de protección recomendados por ANSI - IEEE C62.41-1991, según la categoría de localización

Forma de onda	1,2/50μs [KV]	8/20μs [KA]	0,5μs	100KHz
Categoría				
C1	6	3	-	-
C2	10	5	-	-
C3	20	10	-	-
B1	2	1	170 A	2 KV
B2	4	2	330 A	4 KV
B3	6	3	500 A	6 KV
A1	-	-	2 KV	70 A
A2	-	-	4 KV	130 A
A3	-	-	6 KV	200 A

En el punto anterior se estimó la posible sobretensión debido a un impacto de un rayo cercano a la estructura. La localización que da la norma es de CATEGORIA B, en esta

categoría la norma ANSI - IEEE C62.41, ha hecho pruebas para Ondas de tipo toque, subdividiendo la categoría de acuerdo a la amplitud del transitorio. Se subdivide la categoría de localización en tres clasificaciones que van de 1 hasta 3.

Teniendo en cuenta que la sobretensión estimada es de aproximadamente 5 Kv, podemos ubicar la protección en una CATEGORIA B3. Es decir la protección debe ser especificada para este tipo de onda y para esa determinada amplitud.

3.2.3 Selección de dispositivos. Se selecciona un descargador de corriente de rayo clase B, ubicado en la línea de suministro de corriente de baja tensión (120 V), uno por cada fase (sistema monofásico trifilar):

- Marca: DEHN.
- Ref.: DEHNbloc DB 1 255
- Características:
 - Verificados con corriente de choque tipo rayo (10/350)
 - Descargadores de la clase de exigencias.
 - Vía chispa encapsulada. No produce soplado.
 - Con función de “rompeolas”, que posibilita la utilización coordinada de descargadores de sobretensión compuestos por varistores (por ejemplo: DEHNguard) y/o con el equipo a proteger.
 - Rapidez de respuesta.
 - Su alta resistencia de aislamiento posibilita su empleo también delante del contador.
 - Borna de conexión multifunción para cables y regletas de peine.

- Dependiendo de la forma de la red puede soportar una corriente de choque de rayo 10/350 de hasta 100kA.

Se seleccionada como descargador de sobretensión tipo C ubicada a la salida CC del rectificador:

- Marca: DEHN.
- Ref.: DEHNguard 75
- Características:
 - Para utilización en las intersecciones de las zonas 0_B-1 y más altas dentro del concepto de zonas de protección contra rayos.
 - Para protección de instalaciones de consumidores de baja tensión contra sobretensiones.
 - Descargador de la clase C.
 - Posibilidad de coordinación "continua" con descargadores de corriente de rayo preconectados DEHNport.
 - Forma de ejecución estrecha (construcción modular).
 - Capacidad de derivación muy alta, con varistores de oxido de zinc.
 - Gran seguridad de vigilancia gracias al dispositivo de separación "Thermo-Dynamic-Control" con vigilancia doble.
 - Rapidez de respuesta.
 - Indicación de fallo mediante marca en color rojo en la mirilla de observación.
 - Borna de conexión multifunción, para conexión de conductores y regletas de peine.

Los dispositivos descargadores de tensión seleccionados se podrían instalar en todos los rectificadores que operan en los campos de Cusiana y Cupiagua,

La siguiente tabla muestra los rectificadores de protección catódica por corriente impresa que operan actualmente.

Tabla 10. Rectificadores de protección catódica operando en cusiana y cupiagua

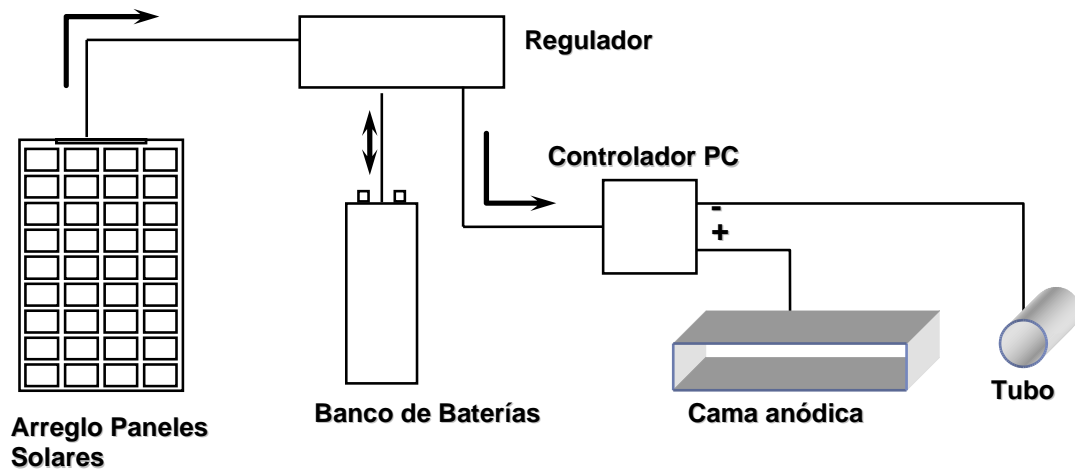
TAG RECTIFICADOR	UBICACIÓN	CIRCUITO	VOLTAJE NOMINAL	AMPERIOS NOMINAL
CPR 003	CPF CUSIANA	CTK1	100 volts	3 Amps
	ARMY CAMP	CTK2	100 volts	2 Amps
CPR 006	CPF	CTK1	100 volts	4 Amps
	CUSIANA	CTK2	100 volts	3 Amps
	SLUG	CTK3	100 volts	2 Amps
	CATCHER	CTK4	100 volts	2 Amps
CPR 005	CPF CUSIANA SHIPPING	CTK1	50 Volts	34 Amps
CPR 009	VEREDA SAN MIGUEL DE FARALLONES	CTK1	100 volts	4 Amps
		CTK2	100 volts	3 Amps
CPR 001	CPF	CTK1	100 volts	6 Amps
	CUPIAGUA	CTK2	100 volts	16 Amps
	SLUG	CTK3	100 volts	8 Amps
	CATCHER	CTK4	100 volts	6 Amps
CPR 010	VEREDA CUPIAGUA	CTK1	100 volts	8 Amps

4. DISEÑO DE PROTECCION CATODICA CON ALIMENTACION PANELES SOLARES

Se realizará un diseño piloto para el rectificador de Cupiagua CPR 010 que actualmente esta alimentada de la red comercial de CA pero con muchas fallas en el suministro, permaneciendo las líneas sin protección durante relativamente largos periodos de tiempo. Con esto también se tiene la ventaja de reducir el riesgo de sobretensiones con el suministro de energía de corriente alterna, garantizando una operación permanente del sistema de protección catódica.

La Figura 5 muestra el diagrama de bloques del sistema de protección catódica con energía solar

Figura 5 Diagrama de bloques del sistema protección catódica con energía solar



- **Paneles Solares.** Están compuestos por varias células fotovoltaicas formadas por una oblea de silicio entre dos mallas metálicas que sido tratada para que cuando incida sobre

ella la luz solar se liberen y se desplacen las cargas eléctricas hacia la superficie. (Las positivas en una dirección y las negativas en otra)

- Regulador de carga. Equipo electrónico cuyas principales funciones son:
 - Cargar la batería de forma óptima
 - Evitar la sobrecarga
 - Evitar la descarga excesiva
 - Facilita la conexión de módulos solares, batería y la carga
 - Monitorización local del sistema
 - Monitorización remota del sistema

- Baterías. Las baterías es el elemento almacenador de energía, Las mas comunes son de plomo-acido y pero también existen de níquel-cadmio. La capacidad esta dada en amperios/hora (AH) y esta determinada por Determinada por la corriente descarga, Tiempo (construcción placa), Tensión de fin de descarga y la temperatura.

- Controlador de protección Catódica. El Controlador de protección catódica es un conversor CC-CC electrónico de estado sólido, que mantiene estable el nivel de tensión seleccionado para diferentes corrientes de carga.

4.1 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE PROTECCION CATODICA

Para el dimensionamiento del sistema primero debemos conocer el consumo de potencia eléctrica en un día normal.

Consumo del sistema de protección catódica:

Actual: 2 ohmios, 12 VDC, 6 Amperios = 72 Vatios por 24 horas al día

Proyectado: 6 ohmios, 36 VDC, 6 Amperios = 216 Vatios por 24 horas al día.

Lo primero que hay que decidir es el voltaje del sistema que se va utilizar (12, 24 o 48 V son los mas utilizados). La principal ventaja de seleccionar un voltaje mayor a 12V es que el diámetro del cable requerido es menor, adicionalmente los sistemas con voltajes más altos pierden menos energía por la resistencia propia del cableado.

Durante los días lluviosos (no Soleados) los paneles solares no pueden producir electricidad, por esta razón se debe tener una reserva de batería (autonomía), se determina cuantos días lluviosos continuos se podría tener.

Tabla 11. Dimensionamiento del sistema solar

DESCRIPCION	VALOR	OBSERVACIONES Y CALCULOS
Consumo total del sistema (W)	216	
Uso en horas/días	24	Para funcionamiento continuo
Total vatios*horas/día (wh/d)	5184	W* h/d = 216*24= 5184
Voltaje nominal del sistema (Voltios)	48	Seleccionado 48 V (múltiplo de 12 V)
Total Amperios Hora/día (Ah/d) DC	108,0	Ah/d= (Wh/d)/ V =5184/48 = 108
Factor de seguridad (1.0 ... 1.5)	1,1	10%
Total requerimiento Ah/d	118,8	108 * 1.1 = 118.8 Ah/d

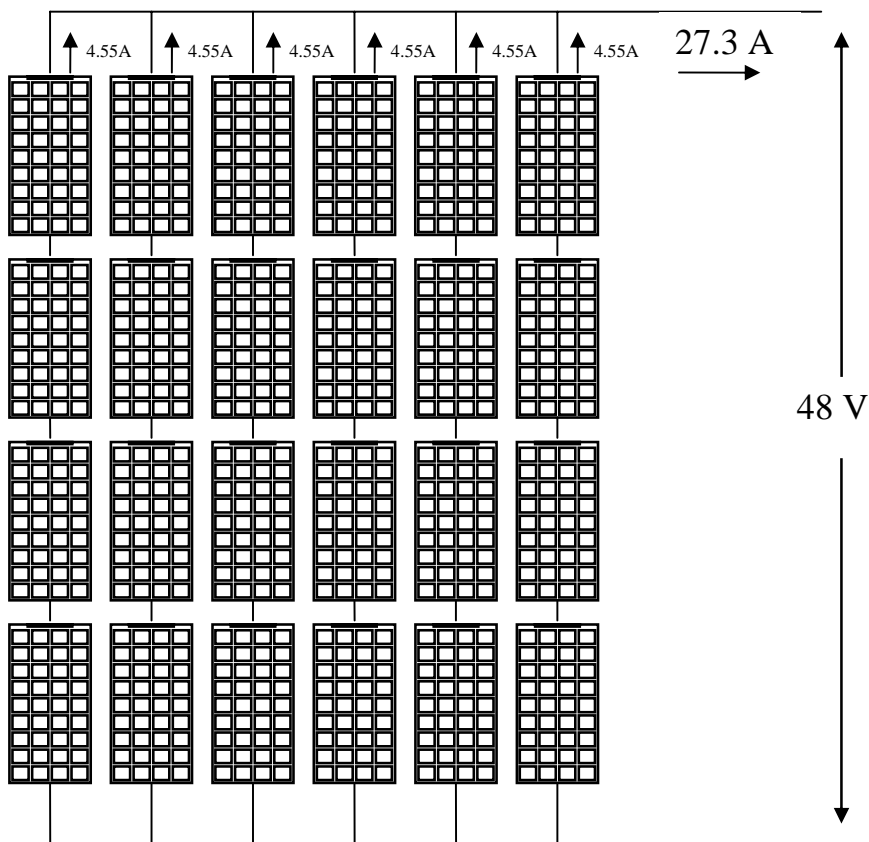
Horas sol Standard disponibles día (h/d)	4,46	Promedio en esta zona
Total corriente requerido arreglo solar (A)	26,6	$(Ah/d)/(h/d) = 118.8/4.46$
Corriente operación de cada módulo (A)	4,55	Modulo seleccionado: Ref. BP 380
Cantidad requerida de módulos en paralelo	6,0	$26.6 / 4.55 = 5.8$
Voltaje nominal del sistema	48	Menor caída de tensión en conductores
Voltaje nominal del módulo	12	Voltaje de cada modulo 12 V
Cantidad requerida de módulos en serie	4	$V \text{ sistema} / V \text{ modulo} = 48/12 = 4$
TOTAL MODULOS REQUERIDOS	24	Mod en paralelo*Mod en serie= 6*4
Total Ah requeridos por día	118,8	
Autonomía recomendada (días)	3	Tiempo carga sin días de sol
porcentaje de capacidad utilizable	0,8	80% recomendado
Capacidad mínima del banco de baterías (Ah)	446	$(Ah/d)*Autonomía/\%CU = 118.8*3/0.8$
Capacidad de la batería (Ah)	510	Batería seleccionada: Sonnenschein-500
Cantidad requerida de baterías en paralelo	1	$Ah \text{ Banco}/Ah \text{ batería} = 446/510 = 0,87$
Voltaje nominal del sistema	48	
Voltaje nominal de la batería	2	Voltaje de la batería seleccionada
Cantidad requerida de baterías en serie	24	$V \text{ sistema}/V \text{ Batería} = 48/2 = 24$
TOTAL BATERÍAS REQUERIDAS	24	Bat. paralelo*Bat serie= 1*24=24
Máxima corriente suministrada por el arreglo	32,8	$Mod \text{ paralelo} * Corriente \text{ mod} * 1.2 = 6*4.55*1.2 = 32.8$
Máxima corriente consumo	4,5	$Consumo \text{ sistema} / Voltaje \text{ nominal} = 216/48 = 4.5$
Voltaje nominal sistema	48	
Regulador seleccionado		Seleccionado BPR48SS, 40-150 A
Cantidad requerida de Reguladores	1	

De acuerdo a los cálculos se requiere un arreglo de 24 paneles solares, 4 en serie por 6 en paralelo como indica la figura 6. Las características eléctricas del modulo solar BP 380 de BP solar son las siguientes:

Tabla 12. Características eléctricas de paneles solares BP 380

Potencia máxima ² (Pmax)	80 W
Tensión de Pmax (Vmp)	17.6 V
Intensidad de Pmax (Imp)	4.55 A
Pmax mínima garantizada	75 W
Corriente de cortocircuito (Isc)	4.8 A
Tensión a circuito abierto (Voc)	22.1 V
Coeficiente de temperatura de Isc	(0.065±0.015) %/°C
Coeficiente de temperatura de Voc	-(80±10) mV/°C
Coeficiente de temperatura de la potencia	-(0.5±0.05) %/°C
NOCT (Temperatura nominal de trabajo)	47±2 °C
Voltaje máximo del sistema	600 V
Valuación de fusión máxima del sistema	20 A (modelos U y H) 15 A (modelos S y L)

Figura 6. Arreglo de 24 paneles solares



El banco de baterías está conformado por 24 baterías en serie de 2 Voltios, marca sonnenschein sellada de tecnología Gel, de 500 AH.

El regulador de carga seleccionado marca MICHA ref.: BPR48SS de 48 voltios y rango de corriente de 40 a 150 A.

Controlador de protección catódica CPCx12A es una fuente conmutada de tecnología PWM (modulación de ancho del pulso) con cuatro sistemas de voltaje de 12, 24, 36 y 48 V y rango de corriente de 0 a 12 A, con temporizador programable de 0 a 999 segundos y supresor de pico por corriente inducida.

5. CONCLUSIONES

Las tensiones de corriente alterna inducidas en la tubería debida a derechos de vías compartidos entre líneas de transmisión eléctrica y líneas de flujo es un peligro potencial tanto para la seguridad de las personas como de la integridad de la tubería.

El efecto de la corriente alterna inducida es casi nulo en las líneas de flujo de Cusiana y Cupiagua, debido a que no existen sistemas de transmisión de energía en los alrededores cercanos. Este efecto se incrementará al producirse alguna falla del sistema eléctrico de los CPF's en equipos como generadores, transformadores, y en subestaciones, pero será de corta duración.

A pesar de que Colombia es uno de los países con mayor actividad de rayos en el mundo, muy poco ha sido la aplicación que se le ha dado a los estudios e investigaciones a nivel mundial y nacional sobre los rayos, principalmente a nivel de protección contra sobretensiones debidas a inducciones producidas por descargas directas e indirectas.

Con la instalación de los dispositivos descargadores de rayos propuestos se puede mitigar en gran parte el daño a rectificadores como ha ocurrido en el pasado.

En cuanto al sistema de alimentación con energía solar de los rectificadores de protección catódica por corriente impresa tiene un costo inicial relativamente alto con respecto al costo de la red comercial, pero tiene la ventaja de ser un suministro de energía confiable y

de buena calidad, además que es medida de eliminar los efectos de las sobretensiones producidas en las redes de alimentación comercial.

BIBLIOGRAFIA

BP Solar Global Marketing. 2002.

CORROSION TECHNOLOGY- Induced AC Creates problems for pipelines in Utility corridor. Article June 1999 Vol. 82 No. 6

DEHN IBERICA – Catálogo general. Protección contra sobretensiones. Julio 2002.

NACE Standard RP0177-2000. Mitigation of alternating Current and lightning effects on metallic structures and corrosion control systems

NEC. Código eléctrico nacional: Norma 2050.

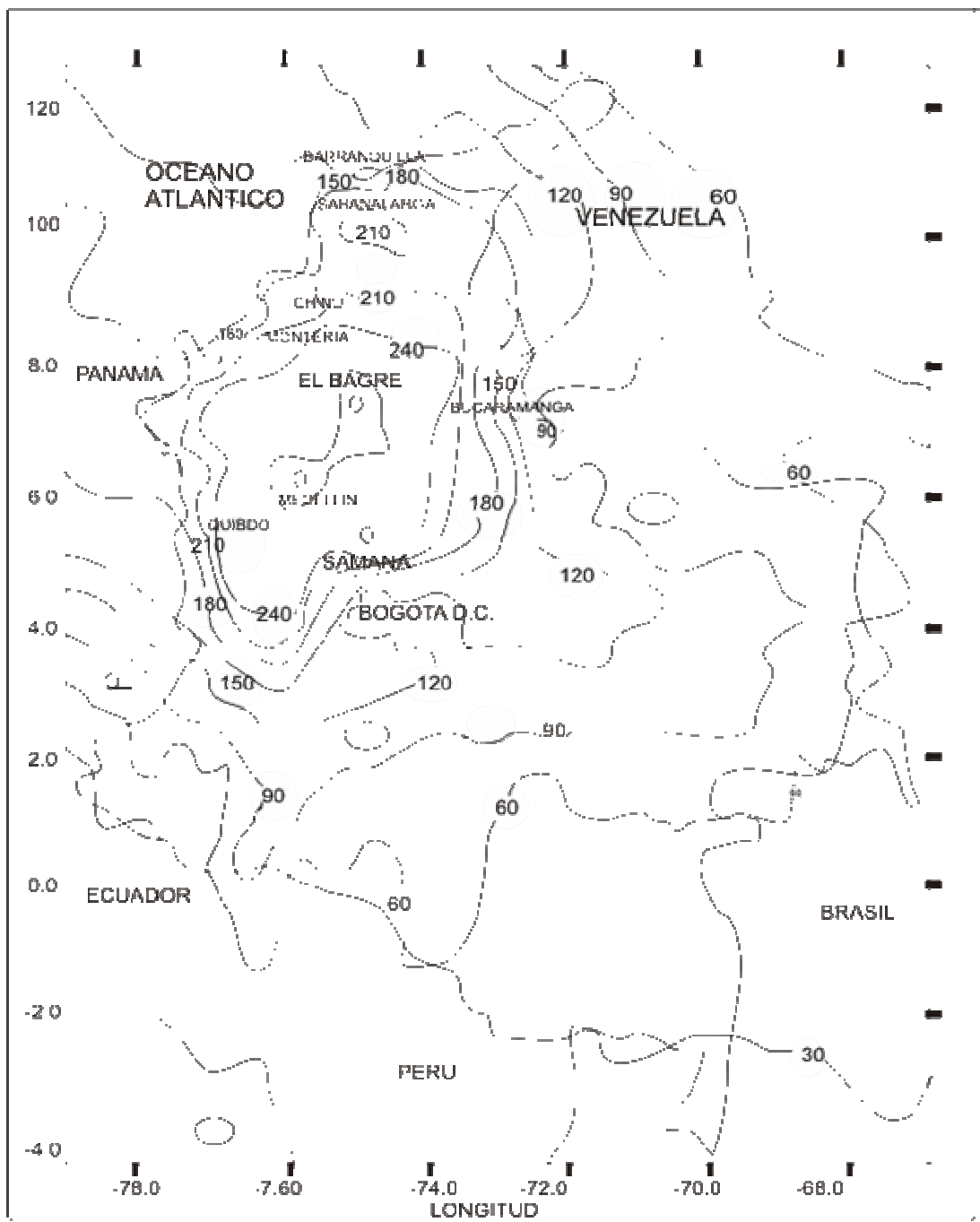
NTC 4552 – 1999. Norma técnica Colombiana de protección contra rayos.

Planos de recorridos de líneas de flujo de bp.en Cusiana y Cupiagua y de líneas de transmisión de media tensión.

TORRES SANCHEZ, Horacio. El rayo. Mitos, leyendas ciencia y tecnología. Bogotá Universidad Nacional de Colombia. Segunda edición, 2002. 409 p.

ANEXO A

CURVA DE PROBABILIDAD DE NIVEL CERAUNEO PARA COLOMBIA



Mapa de NC
para Colombia. 1999