

1-1-2016

Sistema de apantallamiento contra descargas atmosféricas en campos abiertos

Edwin Yesid Arévalo Díaz
Universidad de La Salle, Bogotá

Eduin Herney Moreno Pérez
Universidad de La Salle, Bogotá

Follow this and additional works at: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica

Citación recomendada

Arévalo Díaz, E. Y., & Moreno Pérez, E. H. (2016). Sistema de apantallamiento contra descargas atmosféricas en campos abiertos. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica/145

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Eléctrica by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

**SISTEMA DE APANTALLAMIENTO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN
CAMPOS ABIERTOS**

**EDWIN YESID ARÉVALO DÍAZ
EDUIN HERNEY MORENO PEREZ**

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
PROGRAMA DE INGENIERIA ELÉCTRICA
BOGOTÁ D.C.
2016**

**SISTEMA DE APANTALLAMIENTO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN
CAMPOS ABIERTOS**

**EDWIN YESID ARÉVALO DÍAZ
EDUIN HERNEY MORENO PEREZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de
Ingeniero Electricista**

**Director
M.Sc. Sandra Yomary Garzón Lemos
Profesor Asistente**

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
PROGRAMA DE INGENIERIA ELÉCTRICA
BOGOTÁ D.C.
2016**

Dedicatoria

EDUIN HERNEY MORENO PEREZ

Dedicado a Dios y a mis padres, Maximino Moreno y María Stella Perez, por su amor trabajo y sacrificios en este proceso de crecimiento, gracias a ustedes he logrado dar un paso muy importante y convertirme en lo que soy.

”Su sueño fue formar tres hijos profesionales, y lo lograron”, *gracias*.

EDWIN YESID ARÉVALO DÍAZ

A mis familiares.

A mis padres por su ejemplo de amor, perseverancia, disciplina, responsabilidad y enormes ganas de salir adelante que los caracteriza y los cuales me han inculcado para el logro de cada uno de los sueños anhelados.

A mi hermana Sandra por sus consejos, apoyo, motivación y ayuda en todo el recorrido de mi formación profesional.

A mis maestros.

En especial a la docente Ing. Sandra Garzón, por su apoyo para la culminación de mis estudios profesionales como Ingeniero Eléctrico y para la elaboración de esta tesis.

A mis amigos y compañeros de carrera

Por compartir todos aquellos momentos especiales que marcaron e hicieron parte mi etapa como estudiante universitario.

Agradecimientos

EDUIN HERNEY MORENO PEREZ

A mis hermanos, Elkin Moreno y Darwin Moreno a mi amiga y novia, Magaly Ruiz mi enorme gratitud para ellos, por su apoyo incondicional durante el estudio de mi carrera, quienes haciendo parte de esto demuestran que la unión como familia da sus frutos, ya que la unión hace la fuerza, gracias.

A mi amigo y compañero Edwin Arévalo, con quien nunca desfallecimos, gracias por su dedicación.

Por último y no menos importante agradezco a la Ingeniera Sandra Garzón, directora de este proyecto por su ayuda y su entrega en el transcurso de este proceso.

EDWIN YESID ARÉVALO DÍAZ

Después de un largo y grato recorrido universitario colmado de aprendizajes, oportunidades y retos, y el cual está próximo a culminar para dar camino a una nueva experiencia de vida; como orgulloso estudiante de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de la Salle, quiero agradecer y exaltar la labor docente de mi directora de trabajo de grado Ing. Sandra Garzón, por su alto sentido de compromiso y guía para el desarrollo de esta tesis de grado y mi amigo Eduin Moreno por su dedicación.

De igual manera, quiero agradecer de manera especial a mis padres Nubia y Manuel y a mi hermana Sandra por la colaboración, consejos y apoyo incondicional que me brindaron para la realización de esta tesis. Asimismo, por la oportunidad que me proporcionaron para cumplir y llevar a cabo el sueño de lograr mis metas como futuro profesional de Ingeniería.

¡Mil Gracias!

Resumen

Este proyecto propone un sistema específico de seguridad para los campos abiertos, basados en diferentes modos y mecanismos de seguridad contra descargas eléctricas, en este caso el fenómeno de descarga atmosférica, más conocido como rayo. Los rayos fueron estudiados con el fin de proteger al personal en campos abiertos.

Después de un proceso de investigación y recopilación de datos, toda la información se analizó con el fin de proponer una solución constructiva para campos abiertos con riesgo de descarga atmosférica.

Abstract

This project proposes a specific security system for open fields, based on different security and mechanism modes against electric shocks, in this case the lightning phenomenon, better known as rays. The rays were studied in order to protect staff in open fields.

After a research process, and data collection, all the information was analyzed in order to propose a constructive solution for open fields with risk of lightning.

Tabla de Contenido

1. Introducción.....	10
2. Marco Teórico.....	11
2.1. Sistema de Protección Externo (SPE).....	11
2.2. Sistema de Protección Externo – Función	11
2.2.1. Sistema de Captación	12
2.3. Sistema de Pararrayos	12
2.4. Protección con Sistema Franklin	13
2.5. Protección Pararrayos PDC.....	13
2.6. Principio de Protección con un Sistema Tipo Jaula de Faraday	16
2.6.1. Varillas Tipo Franklin (Bayonetas)	16
2.6.2. Cables Colgantes.....	17
2.6.3. Malla de Conductores	17
2.6.4. Sistema de Bajantes	17
2.7. Sistema de Puesta a Tierra – SPT	19
2.8. Terminal de tierra.....	20
2.9. La Corriente Eléctrica en el Cuerpo Humano.....	21
2.9.1. Recorrido de la Corriente a Través del Cuerpo	22
2.9.2. Efectos de la corriente a través del cuerpo.....	23
2.9.3. Tipo de Corriente y Frecuencia.....	24
2.9.4. Incidencia de Fallecimientos por Descargas Atmosféricas en América Latina....	24
2.9.5. La Incidencia de Fallecimientos por Descargas Atmosféricas a Nivel Mundial y Análisis de Muerte de Jugadores	25
3. Desarrollo del Sistema de Protección Contra Descargas Eléctricas en Espacios Abiertos.....	26
3.1. Sistema de Puesta a Tierra y sus Funciones.....	26
3.2. Materiales de Uso Resistivo.....	27
3.2.1. Aspectos Técnicos	28
3.2.2. Resistividad del Terreno	31
3.2.3. Material Resistivo	31
3.3. Desarrollo de Protección Contra Descargas Eléctricas.....	33
4. Modelamiento Sistema de Apantallamiento	35
4.1. Sistemas de Protección Externa.....	35
4.2. Modelo Propuesto	35
4.2.1 Modelo Propuesto con materiales y descripción	36
4.3. Sistema de captación esfera rodante	39
4.4. Validación del Modelo Propuesto.....	42

4.5.	Modelo bioelectromagnético del Cuerpo Humano	45
4.6.	Simulaciones en el Software EMTP/ATP.....	46
4.7.	Factor de Corrección Atmosférico.....	48
4.7.1.	Factor de Corrección por Altitud	49
5.	Diseño básico del sistema de protección externa contra descargas eléctricas atmosféricas en campo abierto.	50
5.1.	Evaluación nivel de riesgo y de protección contra descargas eléctricas atmosféricas en campo abierto.....	50
5.2.	Indicador de Gravedad.....	55
6.	Sistema de Apantallamiento Contra Descargas Eléctricas Atmosféricas – Aplicación del Modelo Propuesto	58
6.1.	Descripción del Caso de Estudio	58
6.2.	Modelo Propuesto Definitivo en la aplicación del caso de estudio.	59
6.3.	Tensión y Corriente en Pararrayos.....	62
6.4.	Tensión en la Unión Pararrayos - Barra.....	64
6.5.	Prueba de Pararrayo a Baja Frecuencia – Alta Frecuencia	64
6.6.	Efecto Distancia en la Protección con Pararrayos	68
6.6.1.	Protección Descarga Atmosférica - Cuerpo Humano (simulación del modelo)...	68
7.	Resultados y Discusión.....	70
8.	Conclusiones.....	71
9.	Fe de erratas.....	72
10.	Lista de Referencias	74

Lista de Tablas

Tabla 1 Fuente tierra soporte de la seguridad eléctrica – Fabio Casas primera edición pág. 63 ..	31
Tabla 2. Valores máximos del radio de la esfera rodante según el nivel de protección	40
Tabla 3 Datos1 impulso de una descarga atmosférica (Pando, 2006)	43
Tabla 4 Datos2 impulso de una descarga atmosférica (Pando, 2006)	44
Tabla 5 Parámetros eléctricos para los modelos 1 y 2.	46
Tabla 6 Densidad de descargas a tierra para algunas ciudades de Colombia	52
Tabla 7. Medianas del valor pico de la corriente de retorno del rayo en diferentes zonas del planeta (Adaptado de Lee et. Al. 1979).	55
Tabla 8. Indicador de parametro del rayo.	55
Tabla 9. Subindicador relacionado con el uso de la estructura.	55
Tabla 10. Subindicador relacionado con el tipo de estructura	56
Tabla 11. Subindicador relacionado con la altura y el area de la estructura.	56
Tabla 12. Indicador de gravedad	57
Tabla 13. Matriz de niveles de riesgo.	57
Tabla 14 Relación de voltaje – corriente de dps (dispositivo de protección contra sobretensiones)	64

Lista de Figuras

Figura 1 Protección pararrayos PDC (Ingesco, 2013)	14
Figura 2 Protección mediante pararrayos Franklin y mallas Faraday (Ingesco, 2013)	14
Figura 3 Protección externa combinada (Ingesco, 2013).	15
Figura 4 ” Punta captadora tipo Franklin de un asta” (ELECTROPOL, 2016).	15
Figura 5 La corriente eléctrica: Efectos al atravesar el cuerpo humano "Factor de la corriente de corazón" F "" (Gabarda, 1994).	23
Figura 6 "Valores medios de resistencia entre diferentes puntos del cuerpo humano" Norma IEC (LLC, 2014)	24
Figura 7. Ilustración de método de conexión de electodos (DISTRIBUCION, 2006)	30
Figura 8. GEM Intensificador de Tierra (ELECTRIC, s.f.)	32
Figura 9. ELECTRIC-GEL (ELECTRIC, s.f.)	33
Figura 10. Área en la cual se determinó la resistividad cancha de futbol (Universidad de La Salle-sede Floresta).	34
Figura 11. Modelo propuesto del sistema de apantallamiento. Fuente: elaboración propia	36
Figura 12. Componentes del sistema de apantallamiento propuesto. Fuente: elaboración propia	36
Figura 13. Elementos del modelo de sistema de apantallamiento propuesto. Fuente: elaboración propia	38

Figura 14.Elementos del sistema de apantallamiento propuesto conexión bajo tierra. Fuente: elaboración propia.....	39
Figura 15.Espacio protegido por sistema de captación (esfera rodante) Fuente: elaboración propia	41
Figura 16. Diseño sistema de protección contra descargas atmosféricas (esfera rodante) vista lateral Fuente: elaboración propia.....	42
Figura 17 Circuito eléctrico del cuerpo humano propuesto por Andrews. C3 y R5 representan la impedancia del zapato, mientras que R6 es la impedancia de aterrizamiento de los zapatos. En el modelo 1, R3= 300 Ω y R4= 200 Ω y en el modelo 2, R3= R4= 20 Ω	46
Figura 18. Circuito eléctrico del cuerpo humano propuesto por Andrews. C3 y R5 representan la impedancia del zapato, mientras que R6 es la impedancia de aterrizamiento de los zapatos. En el modelo 1, R3= 300 Ω y R4= 200 Ω y en el modelo 2, R3= R4= 20 Ω	47
Figura 19. Evaluación del Riesgo Figura tomada.....	51
Figura 20. Mapa Colombiano de niveles cerámicos	53
Figura 21. Universidad De La Salle Sede Norte - Calle 175, Bogotá, Colombia; imagen tomada de Google Earth	58
Figura 22. Cancha de futbol Universidad De La Salle Sede Norte - Calle 175, Bogotá, Colombia; imagen tomada de Google Earth.....	59
Figura 23. Vista superior junto con componentes del sistema de apantallamiento propuesto. Fuente: elaboración propia.....	60
Figura 24. Modelo de aplicación del sistema de apantallamiento propuesto definitivo. Fuente: elaboración propia.....	60
Figura 25.Conexión pararrayos y anillo en tierra interconectados vista lateral de la cancha de futbol. Fuente: elaboración propia.	61
Figura 26 Conexión anillo en tierra interconectada vista frontal de la cancha de futbol. Fuente: elaboración propia.....	61
Figura 27. Ejemplo de un sistema de apantallamiento aplicado a un espacio abierto. Fuente: elaboración propia.....	62
Figura 28. Montaje de simulación 1 software ATPdraw	65
Figura 29. Montaje de simulación impulso tipo Heidler, software ATPdraw	66
Figura 30. Cuerpo humano – Protección con anillo y pararrayo. Simulación en software ATPdraw	68

Lista de Gráficas

Gráfica 1. La corriente eléctrica: Efectos al atravesar el cuerpo humano. "Efecto sobre la piel " (Gabarda, 1994)	22
Gráfica 2. La corriente eléctrica: Efectos al atravesar el cuerpo humano "corriente alterna, el efecto en el organismo" (Gabarda, 1994)	23
Gráfica 3. Variación de la resistividad del suelo con respecto a la humedad, ante diferentes frecuencias. (DISTRIBUCION, 2006)	29
Gráfica4. Ilustración de variaciones de resistividad por diversos factores (DISTRIBUCION, 2006)	29
Gráfica 5. Resistividad tabla comparativa (ELECTRIC, s.f.).....	32
Gráfica 6.Dato1 comportamiento Primer impulso de una descarga atmosférica (rayo) (Pando, 2006)	43
Gráfica 7. Dato 2 comportamiento Primer impulso de una descarga atmosférica (rayo) (Pando, 2006)	44
Gráfica 8. Comportamiento del cuerpo humano ante una descarga. Simulación en ATP	47
Gráfica 9. Determinación de la corriente máxima de la descarga.	54
Gráfica 10. Característica pararrayos- IEEE Std 1313.2-1999.Simplified method.	63
Gráfica 11.Resultado grafica de simulación 1(impacto de tensión y corriente) software ATPdraw	66
Gráfica 12.Forma de Onda de la corriente sobre pararrayos a alta frecuencia software ATPdraw	67
Gráfica 13. Forma de Onda de la tensión sobre pararrayos a alta frecuencia software ATPdraw	67
Gráfica 14.Comportamiento de cuerpo humano ante descarga atmosférica actuando protección anillo y pararrayo. Simulación en software ATPdraw.....	68
Gráfica 15. Acción de pararrayos y anillo en campo abierto. Simulación en software ATPdraw	69

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1.....	30
Ecuación 2.....	30
Ecuación 3.....	34
Ecuación 4.....	34
Ecuación 5.....	40
Ecuación 6.....	49
Ecuación 7.....	49
Ecuación 8.....	49
Ecuación 9.....	50
Ecuación 10.....	56
Ecuación 11.....	63
Ecuación 12.....	63
Ecuación 13.....	63
Ecuación 14.....	63
Ecuación 15.....	64
Ecuación 16.....	64
Ecuación 17.....	64

1. Introducción

En el transcurso de los años, la descarga eléctrica sigue siendo un tema de debate, debido a que los científicos han seguido estudiando las causas de este fenómeno, que van desde las perturbaciones atmosféricas como como son el viento, la humedad, la presión, hasta la acumulación de partículas solares cargadas.

Debido a este fenómeno natural, la humanidad a nivel global ha sufrido muertes incesantes por la falta de sistemas de protección en campos abiertos, sencillamente, son lugares totalmente expuestos a caídas de descargas atmosféricas debido a que los rayos pueden producirse en las nubes de cenizas de erupciones volcánicas; pueden ser causados por violentos incendios forestales que generen polvo capaz de crear carga estática; por cambios de temperaturas o por las múltiples causas que una descarga eléctrica puede llegar a un punto a tierra siendo nosotros mismos punto blanco de tales descargas.

La falta de pararrayos en los campos abiertos ha provocado que personas mueran o resulten heridas, a causa de un rayo mientras transitan o practican algún deporte o realizan actividades al aire libre. En los últimos años a nivel mundial, ha venido en aumento el número de muertes a causa de las deficiencias en seguridad eléctrica en campos abiertos contra descargas atmosféricas, debido a que solo se piensa en la comodidad, en diseños estéticos, pero no en este tipo seguridad para las personas.

Es por esto que en este documento se desarrolló el diseño de un sistema de apantallamiento que disminuya las afectaciones causadas por descargas atmosféricas en campos abiertos, disminuyendo así los índices de mortalidad a causa de este fenómeno natural. Analizando e identificado materiales de uso resistivo, y modelos existentes se propone un modelo de sistema de apantallamiento frente a choques eléctricos causados por descargas atmosféricas, y que estos sean dirigidos directamente a la puesta a tierra sin riesgo alguno.

Se realizó la validación del modelo propuesto y la efectividad de los materiales del sistema de apantallamiento mediante simulaciones, las cuales fueron realizadas para el caso de estudio correspondiente a la cancha de fútbol de la Sede de la Floresta de la Universidad de La Salle.

2. Marco Teórico

“El rayo es un fenómeno meteorológico de origen natural, cuyos parámetros son variables espacial y temporalmente. La mayor incidencia de rayos en el mundo se da en las tres zonas de mayor convección profunda: América tropical, África central y norte de Australia. Colombia, por estar situada en la Zona de Influencia Intertropical, presenta una de las mayores actividades de rayos del planeta; de allí la importancia de la protección contra dicho fenómeno, pues si bien los métodos de apantallamiento y protección desarrollados a nivel mundial se pueden aplicar, algunos parámetros del rayo son particulares para esta zona”

Tomado de Ministerio de Minas y Energía – RETIE: Artículo 18. Requisitos de protección contra rayos.

2.1. Sistema de Protección Externo (SPE)

Es una parte del SIPRA (Sistema Integral de Protección Contra Rayos) que consta principalmente de los siguientes elementos:

- Sistema de puntas de captación (pararrayos tipo bayoneta)
- Sistema de conductores bajantes
- Sistema de puesta a tierra

Este tipo de dispositivos en o sobre el elemento a proteger cumplen con el objetivo de captar, conducir y dispersar la energía de un rayo cuando la estructura a proteger sea impactada por una descarga eléctrica atmosférica (CERTIFICACION, Protección contra descargas eléctricas atmosféricas (rayo): Principios Generales. NTC 4552-3, 2008).

2.2. Sistema de Protección Externo – Función

Un sistema de protección externo tiene como función esencial interceptar las descargas que se dirigen hacia la estructura, incluyendo aquellas que pueden impactar en sus costados y conducir la corriente del rayo hasta el suelo o terreno, dispersando allí la corriente. Este sistema debe dispersar la energía sin causar daños térmicos, electrodinámicos o mecánicos, ni chispas peligrosas que puedan iniciar un fuego o una explosión.

Se consideran dos tipos de protección externa: uno aislado eléctricamente de la estructura y otro unido directamente a la misma. La decisión de qué tipo de sistema a utilizar depende del riesgo de efectos térmicos o explosivos en el punto de impacto de rayo y del tipo de elementos almacenados en la estructura.

2.2.1. Sistema de Captación

El sistema de captación es el encargado de interceptar las descargas atmosféricas que vayan a impactar directamente a la estructura y enviar la corriente de la descarga a las bajantes de la estructura. Puede estar compuesta por cualquier combinación de los siguientes elementos:

- Varilla tipo Franklin
- Cables colgantes
- Malla de conductores

Los componentes de captación aéreos instalados en una estructura se deben localizar en las esquinas, puntos expuestos sobresalientes de la estructura y en los bordes. Se debe tener en cuenta que los dispositivos de interceptación de descargas atmosféricas deben ser varillas de cobre sólidas o tubulares en forma de bayoneta, con una altura por encima de las partes altas de la estructura no menores a 25 cm. Sin embargo, la norma IEC permite utilizar aluminio, aleación de aluminio o acero, entre otras.

2.3. Sistema de Pararrayos

Las instalaciones de pararrayos consisten en un mástil metálico (acero inoxidable, aluminio, cobre o acero) con un cabezal captador. El cabezal tiene muchas formas en función de su principio de funcionamiento: puede ser en punta, multipuntas, semiesférico o esférico y debe sobresalir por encima de las partes más altas del edificio. El cabezal está unido a una toma de tierra eléctrica por medio un cable de cobre conductor. La toma de tierra se construye mediante picas de metal que hacen las funciones de electrodos en referencia al terreno o mediante placas de metal conductoras también enterradas. En principio, un pararrayos protege una zona teórica de forma cónica con el vértice en el cabezal; el radio de la zona de protección depende del ángulo de apertura de cono, y éste a su vez depende de cada tipo de protección. Las instalaciones de pararrayos se regulan en cada país por guías de recomendación o normas.

El objetivo principal de estos sistemas es reducir los daños que puede provocar la caída de un rayo sobre otros elementos. Muchos instrumentos son vulnerables a las descargas

eléctricas, sobre todo en el sector de las telecomunicaciones, electromecánicas, automatización de procesos y servicios, cuando hay tormenta con actividad eléctrica de rayos. Casi todos los equipos incluyen tecnologías electrónicas sensibles a las perturbaciones electromagnéticas y variaciones bruscas de la corriente. La fuente más importante de radiación electromagnética es la descarga del rayo en un elemento metálico o, en su caso, en un pararrayos. Las instalaciones de pararrayos generan pulsos electromagnéticos de gran potencia cuando operan.

Un sistema de protección contra descargas, llamado de pararrayos, debe:

- Capturar el rayo en el punto diseñado para tal propósito llamado terminal aérea.
- Conducir la energía de la descarga a tierra, mediante un sistema de cables conductores que transfiere la energía de la descarga mediante trayectoria de baja impedancia, Y.
- Disipar la energía en un sistema de terminales (electrodos) en tierra.

2.4. Protección con Sistema Franklin

Los pararrayos Franklin, de forma cónica, tienen una punta perfectamente aguzada y estética. Existen en versión cobre niquelado cromado y en acero inoxidable; su longitud estándar es de 2,40 m y puede ser aumentada adjuntando elementos alargadores en acero tratado o acero inoxidable. Estos conjuntos no necesitan estar tensionados por cables y pueden alcanzar alturas de hasta 7 a 8 metros. La extremidad de los pararrayos Franklin tiene una punta llena en bronce marino o inoxidable.

2.5. Protección Pararrayos PDC

Es la que ofrecen los pararrayos con dispositivo de cebado (PDC), que emiten un flujo de iones dirigido a las nubes (trazador). La carga eléctrica positiva de estos iones atrae los rayos (carga negativa), lo que aumenta la probabilidad de que la descarga se produzca sobre el captador.

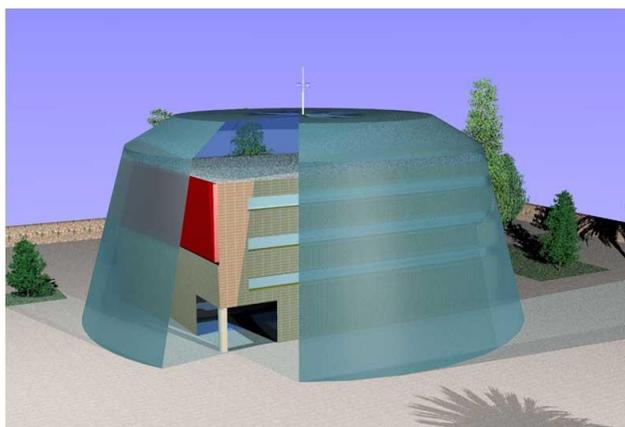


Figura 1 Protección pararrayos PDC (Ingesco, 2013)

- ***Protección Mediante Pararrayos Franklin y Mallas Faraday***

Es la que ofrecen sistemas (tipo ‘**jaula de Faraday**’) que no provocan ningún efecto para la captación del rayo (acción pasiva). Estos sistemas pueden aprovechar elementos de la estructura (componentes naturales) para la conducción de la descarga de la corriente hasta tierra.

Esta protección se utiliza en la protección de edificios que por sus características, interés histórico, u otros, no admiten otro sistema de protección.



Figura 2 Protección mediante pararrayos Franklin y mallas Faraday (Ingesco, 2013)

- ***Protección Externa Combinada***

Los sistemas de protección externa activa y pasiva pueden combinarse, y hay que elegirlos atendiendo a las características de la construcción que hay que proteger (INGESCO, 2013).

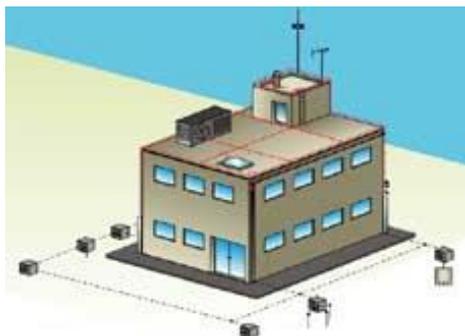


Figura 3 Protección externa combinada (Ingesco, 2013)

Teniendo en cuenta lo anterior, la selección de este pararrayos se hace también contando con la norma NTC 4552-3 la cual tiene por título “PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS (RAYOS). PARTE 3. DAÑOS FÍSICOS A ESTRUCTURAS Y AMENAZAS A LA VIDA”.

Finalmente, el pararrayos a utilizar es la punta captadora tipo Franklin de un asta, debido a que nos brinda una protección contra sobretensiones atmosféricas además:

- En zonas con intensidad de descargas atmosféricas muy alta.
- En lugares donde las condiciones de puesta a tierra o apantallamiento son incompletas.
- Para instalaciones importantes.
- Ideales para aplicaciones con una gran actividad sísmica.



Figura 4 ” Punta captadora tipo Franklin de un asta” (ELECTROPOL, 2016)

2.6. Principio de Protección con un Sistema Tipo Jaula de Faraday

El sistema consiste en la recepción del rayo a través de un conjunto de puntas captadoras unidas entre sí por cable conductor, formando una malla, y derivarla a tierra mediante una red de bajantes conductores.

Los nimbus emiten descargas eléctricas de polaridad inversa al rayo, consiguiendo atraerlo y elevar el punto de impacto por encima de la estructura a proteger, por lo que crea mayor radio de cobertura en la base, frente a un pararrayos convencional.

Como se puede apreciar en la figura 1, la zona de cobertura es mucho mayor que con cualquier otro dispositivo de protección, permitiendo con un solo dispositivo de captación, proteger edificios, construcciones o instalaciones de gran superficie.

Un pararrayos nimbus no es comparable a una punta Franklin, sino a toda una instalación de ellas, necesarias para cubrir la misma área de protección, con el consiguiente ahorro en instalación y materiales de bajantes, tomas de tierra, equipotencialidad de las mismas, etc. También presenta ventajas con respecto a los otros sistemas para la protección de estructuras abiertas, como pueden ser superficies al aire libre, instalaciones deportivas, etc.

En resumen, el sistema nimbus ofrece grandes ventajas y un ahorro considerable con respecto a los sistemas pasivos de captación.

Gracias a su dispositivo de cebado, emite una señal de alta tensión en amplitud y frecuencia determinada y controlada. Asegura su eficacia mediante la rápida formación de un trazador ascendente que se propaga de manera continua hacia el trazador descendente del rayo, consiguiendo elevar el punto de impacto de la descarga por encima de la estructura protegida, con lo que se consigue ampliar el radio de protección frente a un pararrayos convencional (EOSA, 2009)

2.6.1. Varillas Tipo Franklin (Bayonetas)

“Su misión es provocar la excitación atmosférica por encima de cualquier otro punto de la estructura a proteger, para aumentar la probabilidad que la descarga incida en su zona de influencia, y derivar a tierra la corriente del rayo” (TORRES SÁNCHEZ).

2.6.2. Cables Colgantes

“Este sistema consiste en la protección formada por uno o múltiples conductores aéreos situados sobre la estructura a proteger. Los conductores se deben unir a tierra mediante aterrizadores en cada uno de sus extremos” (TORRES SÁNCHEZ).

2.6.3. Malla de Conductores

“Este sistema consiste en la recepción del rayo a través de un conjunto de puntas captadoras unidas entre sí por cable conductor, formando una malla, y derivarla a tierra mediante una red de conductores” (TORRES SÁNCHEZ).

2.6.4. Sistema de Bajantes

Este sistema tiene como objetivo conducir las corrientes de rayo por el sistema de captación aérea y llevarlas de forma segura hacia el sistema de puesta a tierra. Para ello las bajantes deben ser ubicadas de manera tal que, a partir del punto de impacto del rayo hasta la tierra, se cumplan 3 requisitos:

- Existencia de varios caminos paralelos para la corriente.
- La longitud de los caminos de corriente sea mínima.
- Equipotencialización de partes conductoras de la estructura

“Una buena práctica de construcción consiste en realizar conexiones laterales de las bajantes cada 10 m ó 20 m de separación, principalmente en edificios de alturas superiores a 30 metros. Así mismo, es pertinente instalar tantas bajantes como sea posible igualmente espaciadas alrededor del perímetro interconectado por el anillo conductor, lo cual reduce la probabilidad de chispas peligrosas y facilita la protección interna. Esta condición es cumplida en estructuras con marcos metálicos y estructuras de concreto reforzado en el cual el acero interconectado es eléctricamente continuo”. (TORRES SÁNCHEZ).

“Se consideran dos tipos de sistemas de bajantes, aquel que puede estar aislado eléctricamente de la estructura y otro unido directamente a la misma. La decisión de cual tipo de sistema utilizar depende del riesgo de efectos térmicos o explosivos en el punto de impacto de rayo y del tipo de elementos almacenados en la estructura.” (TORRES SÁNCHEZ).

La instalación de un sistema aislado depende del sistema de captación aérea:

- Si el sistema de captación aérea consiste en varillas montadas en postes o mástiles no metálicos o de material sin refuerzo en acero interconectado, es necesario al menos una bajante por cada poste. Si los postes son metálicos o con material con acero interconectado no es necesario el uso de bajantes, siempre y cuando se garantice continuidad entre la punta de captación y el sistema de puesta a tierra.
- Si el sistema de captación aérea consiste en cables colgantes, es necesario al menos una bajante en cada soporte de los cables.
- Si el sistema de captación aérea consiste en una red de conductores, es necesario al menos un bajante en cada soporte del terminal.

“Para la ubicación de sistema de bajantes no aislado, el número de bajantes no debe ser inferior a 2 y debe estar distribuido por el perímetro de la estructura a proteger, sujeto a restricciones prácticas y arquitectónicas” (TORRES SÁNCHEZ).

Es importante tener en cuenta las siguientes recomendaciones respecto a las bajantes:

- La longitud debe ser la menor posible, evitando la formación de lazos o curvaturas en su trayectoria y en el caso que estas últimas sean inevitables, su ángulo no debe ser menor a 90 grados y su radio de curvatura no menor a 200 mm.
- No es recomendable ubicar bajantes en áreas donde se congreguen o transiten personas frecuentemente (como es el caso de escaleras o vías operacionales).
- Es recomendable que exista una bajante en cada esquina expuesta a la estructura.
- Deben ser instaladas de tal manera que garanticen la continuidad eléctrica entre los conductores del sistema de captación aérea.
- No deben ser instaladas dentro de canaletas para aguas, aun si estas están cubiertas con material aislante. Los efectos de la humedad en las canaletas para aguas producen gran corrosión en los conductores de las bajantes.

Es recomendable que las bajantes se ubiquen de manera tal que permitan tener un aislamiento eléctrico o una distancia adecuada entre las puertas y las escaleras metálicas de acuerdo con lo descrito a continuación: *“En el caso de líneas o partes conductoras externas conectadas a la estructura, es siempre necesario asegurar la unión equipotencial (por conexión directa o por medio de DPS) en el punto más cercano al ingreso a la estructura”* (TORRES SÁNCHEZ).

2.7. Sistema de Puesta a Tierra – SPT

“El sistema de puesta a tierra es usado para dispersar y disipar la corriente de rayo que viene por las bajantes reduciendo al mismo tiempo el peligro de tener tensiones de paso y de contacto peligrosas. La forma de puesta a tierra y sus dimensiones son un criterio importante en su diseño. En términos generales, para el sistema de protección externa se debe buscar un bajo valor de resistencia de puesta a tierra (si es posible menor a 10Ω en baja frecuencia)” (TORRES SÁNCHEZ).

“Para los sistemas de puesta a tierra de la protección contra rayos es recomendable que estos estén interconectados con todos los sistemas de puesta a tierra (comunicaciones, potencia, ductos, etc.)” (TORRES SÁNCHEZ).

Objetivo de un Sistema de Puesta a Tierra – SPT

El SPT es una parte esencial de las instalaciones eléctricas, tanto en alta como en baja tensión. Un buen SPT asegura:

- La protección de personal, limitando las tensiones de paso y de contacto a valores seguros.
- La protección de instalaciones contra daños por rayos.
- La Compatibilidad Electromagnética (CEM), para la limitación de perturbaciones electromagnéticas.
- El correcto funcionamiento de la red de energía eléctrica al servir de referencia común de tensión y para asegurar una buena calidad de energía eléctrica.

“Para tener un óptimo funcionamiento del sistema de puesta a tierra, se deben analizar dos fenómenos: los rayos y las fallas a tierra en los sistemas de potencia.

Estos fenómenos pueden causar circulación de grandes corrientes, las cuales pueden crear tensiones peligrosas en las instalaciones. La amplitud de las corrientes abarca un rango entre unos pocos amperios hasta las decenas de kiloamperios por fallas o rayos. Desde el punto de vista del espectro de frecuencia, estos fenómenos producen señales cuyas frecuencias varían entre los 50/60 Hz hasta varios mega Hertz”.

“El Sistema de Puesta a Tierra (SPT) es una parte del Sistema de Protección Externa (SPE) que conduce y dispersa corrientes de rayo en el suelo o terreno. Comprende toda unión directa entre los equipos eléctricos y electrónicos con el terreno o una masa metálica, con el objeto de conseguir que entre el conjunto de instalaciones, edificios y superficie próxima del terreno no existan diferencias de potencial peligrosas (tensiones de paso y de contacto) y que, al mismo tiempo, permita el paso a tierra de las corrientes de falla o de rayo”.

“Aunque algunos elementos de un SPT pueden disponerse para que cumplan una función específica, forman parte de un único sistema. Las normas nacionales e internacionales exigen que todos los elementos de un SPT estén conectados entre sí formando una red equipotencial”.

Un SPT comprende la Red Equipotencial (RE) y la Puesta a Tierra (PT). “La RE es el conjunto de conductores que conectan varias partes del sistema eléctrico y las estructuras de una instalación a un potencial igual. Tiene como función interconectar la Puesta a Tierra con todas las partes conductoras de la estructura y del sistema interno (sistemas eléctricos y electrónicos dentro de una estructura, excluidos los conductores activos) para reducir las diferencias de potencial y el campo magnético causados por las corrientes de rayo”.

La PT es un conjunto de elementos conductores que proveen un contacto eléctrico directo con el suelo y dispersan las corrientes de rayo a tierra. Estos elementos pueden ser:

- Electrodo: parte o grupo de partes de la PT que suministran contacto directo eléctrico con la tierra y dispersa las corrientes de rayo en esta. Pueden ser verticales, horizontales o se puede utilizar la cimentación de acero reforzado de la estructura, en este último caso se conocen como electrodos de puesta a tierra de cimentación.
- Anillos: electrodos a tierra que forman un lazo cerrado alrededor de la estructura. Interconectan las bajantes para distribuir las corrientes de rayo entre ellos.
- Enmallados: interconexión de las puestas a tierra de varias estructuras (TORRES SÁNCHEZ).

2.8. Terminal de tierra

Este puede consistir de un anillo de cobre enterrado (designado en EE.UU. como contrapeso) que rodea la estructura y/o barras de tierra verticales. Se requiere que la

impedancia del terminal de tierra (es decir, después de una conexión de bajada) sea máximo de 10 ohm. El aluminio no se permite para uso bajo tierra. Cada conductor de bajada debe tener su propio electrodo de tierra terminal y estos normalmente están conectados entre sí para formar un anillo, con electrodos horizontales usados para interconectarlos y ayudar a reducir la impedancia global. Los terminales de tierra más comunes son barras de al menos 1,5 m de longitud, con un mínimo para cada sistema de 9 m.

El anillo ayuda a lograr una ecualización de potencial en la superficie del suelo, además de controlar el potencial. Esto último ayuda a reducir el voltaje de contacto que puede experimentar una persona en contacto con el conductor de bajada durante una descarga atmosférica.

Aunque las otras partes del sistema de protección pueden diseñarse eléctricamente aisladas, el arreglo de electrodos no debe serlo. La instalación completa debe subir conjuntamente su potencial, para evitar diferencias de voltajes excesivos y esto significa que el terminal de tierra debe ser conectado al resto de los electrodos de tierra y en lo posible diseñado como una entidad. En el interior de edificios, es necesario contactar a la compañía eléctrica si el sistema de protección contra descarga atmosférica se conecta al terminal de tierra. Aunque esto puede causar un potencial más elevado en el sistema de puesta a tierra externo, la conexión generalmente es necesaria para asegurar que todas las estructuras metálicas expuestas estén conectadas.

Normalmente la protección contra descarga atmosférica y las tierras del sistema de potencia deben interconectarse. Donde esto no es deseable por razones técnicas, entre ellas puede instalarse un «ecualizador de potencial de tierra». Este interconectará los sistemas de puesta a tierra si el voltaje entre ellos excede un determinado valor, típicamente varios cientos de volts (PERU, 2013).

2.9. La Corriente Eléctrica en el Cuerpo Humano

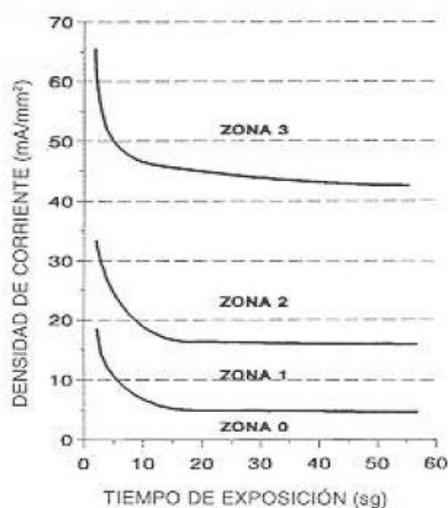
Las consecuencias del paso de la corriente por el cuerpo pueden ocasionar desde lesiones físicas secundarias (golpes, caídas, etc.), hasta la muerte por fibrilación ventricular.

Una persona se electriza cuando la corriente eléctrica circula por su cuerpo; es decir, cuando la persona forma parte del circuito eléctrico, pudiendo, al menos, distinguir dos puntos de contacto: uno de entrada y otro de salida de la corriente. La electrocución se produce cuando dicha persona fallece debido al paso de la corriente por su cuerpo

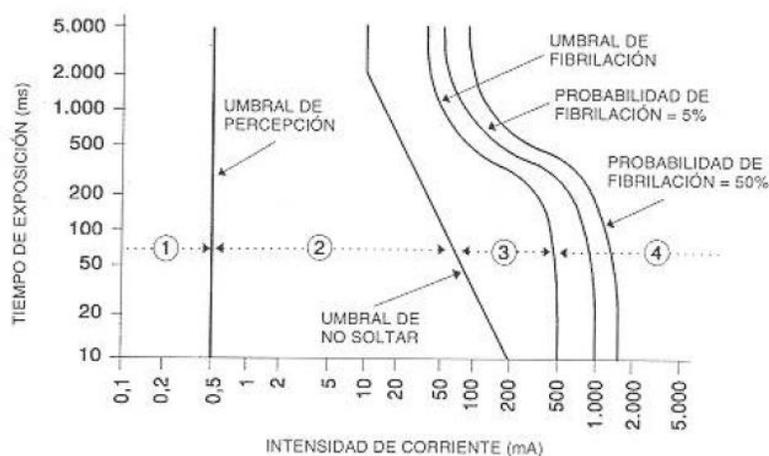
2.9.1. Recorrido de la Corriente a Través del Cuerpo

La gravedad del accidente depende del recorrido de la misma a través del cuerpo. Una trayectoria de mayor longitud tendrá, en principio, mayor resistencia y por tanto menor intensidad; sin embargo, puede atravesar órganos vitales (corazón, pulmones, hígado, etc.) provocando lesiones mucho más graves. Aquellos recorridos que atraviesan el tórax o la cabeza ocasionan los mayores daños. Ver gráfica 1.

Las gráficas 2 y la figura 5 indican los efectos de la intensidad en función del tiempo de aplicación, dependiendo la ruta de circulación de corriente eléctrica que presenta el corazón en el ser humano. Para cada ruta a atravesar en el cuerpo desde el corazón, se determina como " F ", siendo esta el factor de corriente que permite el cálculo de las corrientes de equivalencia de riesgos. (Gabarda, 1994).



Gráfica 1. La corriente eléctrica: Efectos al atravesar el cuerpo humano. "Efecto sobre la piel " (Gabarda, 1994)



Gráfica 2. La corriente eléctrica: Efectos al atravesar el cuerpo humano "corriente alterna, el efecto en el organismo" (Gabarda, 1994)

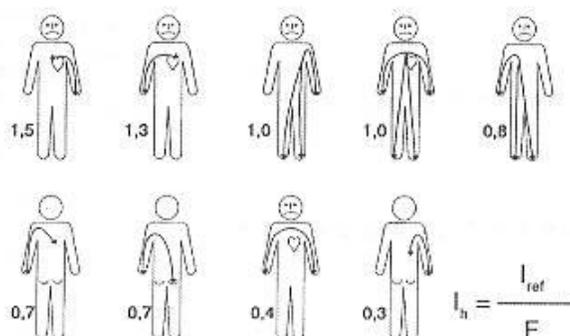


Figura 5 La corriente eléctrica: Efectos al atravesar el cuerpo humano "Factor de la corriente de corazón" F "" (Gabarda, 1994)

2.9.2. Efectos de la corriente a través del cuerpo

Los efectos que puede causar una descarga eléctrica sobre el cuerpo humano es la fibrilación ventricular dado que la corriente que pasa por el corazón causa la pérdida de coordinación de las fibras musculares del órgano, deteniendo la circulación de la sangre y causando la muerte. Otro efecto es un paro respiratorio cuando la descarga eléctrica hace que los músculos del pecho del ser humano se contraigan al paso de la corriente.

- **Impedancia del Cuerpo Humano**

La norma IEC 479 establece unos valores de resistencia del cuerpo humano en función del estado de la piel, que para una tensión de 250 V son los siguientes:

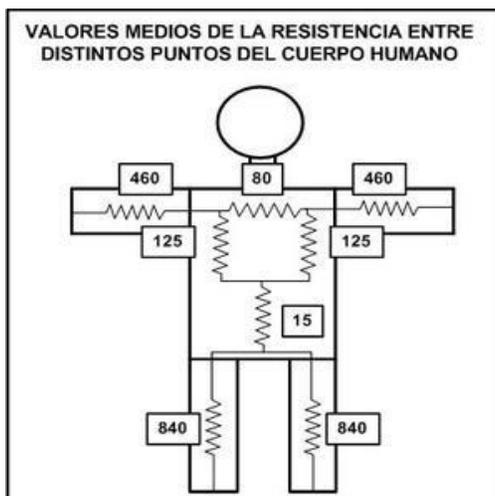


Figura 6 "Valores medios de resistencia entre diferentes puntos del cuerpo humano" Norma IEC (LLC, 2014)

2.9.3. Tipo de Corriente y Frecuencia

Los efectos de la corriente continua o la corriente alterna sobre el cuerpo humano son distintos, debido a la frecuencia habitual de la corriente alterna (50 o 60 Hz) que hace que aumente el riesgo de fibrilación ventricular. La frecuencia de la corriente alterna se puede superponer al ritmo cardíaco y producir una alteración en el mismo. La corriente continua y la corriente alterna de frecuencia superior a 10 000 Hz no producen fibrilación ventricular y por eso son menos peligrosas, pero sí producen el resto de los efectos.

En corriente continua los umbrales son del orden de cuatro veces mayores que en corriente alterna.

2.9.4. Incidencia de Fallecimientos por Descargas Atmosféricas en América Latina

En los últimos años los rayos mataron a un promedio de 1,7 personas por cada millón de habitantes en América Latina contra el 0,1 por millón de habitantes en los países desarrollados, según muestra un estudio realizado en Brasil, el primero de su tipo.

Esto significa que la incidencia de muertes por rayos en América Latina es 17 veces mayor que en Europa y Estados Unidos. Datos obtenidos en exclusiva por la BBC (Corporation, 2013), son parte de una encuesta realizada por ELAT (Grupo de

Electricidad Atmosférica), un organismo vinculado al Ministerio de Ciencia y Tecnología del país sudamericano.

Brasil lidera el número de muertes en números absolutos, por ser el país más poblado y recibir la mayor cantidad de rayos (un promedio de 50 millones por año). Pero Cuba y Panamá tienen la mayor proporción de muertes causadas por este fenómeno natural, debido a la alta densidad de descargas eléctricas y el bajo nivel de infraestructuras.

A pesar de que algunos países no ofrecen detalles de las circunstancias de las muertes por rayos, llama la atención de los investigadores la cantidad de muertes que ocurren dentro de las casas en Brasil (20%) y Colombia (35%). En los países desarrollados esta tasa es del 1%. "Esto demuestra que hay una falta de infraestructura aquí y de nuestros vecinos. Las redes eléctricas y telefónicas todavía están mucho menos protegidas". (Junior, 2014).

2.9.5. La Incidencia de Fallecimientos por Descargas Atmosféricas a Nivel Mundial y Análisis de Muerte de Jugadores

Los rayos o descargas eléctricas directas o por transferencia, causan un promedio de 7000 muertos y arriba de 15,000 heridos anualmente en el mundo según estadísticas; haciendo un análisis de muerte de jugadores hasta el año 2010 por causas diferentes a muerte natural y que fueron conocidas y registradas se puede afirmar que de cada 126 muertes 5 han sido por descargas eléctricas, lo que corresponde a un 3.97%; esto sin contar entre estas cifras con hechos que no se dieron en primera división, o que no fueron divulgados y otros que fueron divulgados como el caso excepcional de los once jugadores de la República Democrática del Congo en el año de 1998 cuando mueren a causa de una descarga eléctrica, lo cual es puesto en duda al decirse que la causa más bien se dio por brujería y no por un hecho de la naturaleza, lo cual aún está en duda.

La mayoría de los decesos y heridos a causa de rayos ocurren cuando la gente se encuentra en espacios exteriores durante los meses de verano entre el mediodía y el atardecer y sobre todo en días de lluvia o tormentas eléctricas, es por esto que por medio de este proyecto pretendemos diseñar un nuevo prototipo de apantallamiento para mejorar la seguridad de las personas que se encuentren en un campo abierto, teniendo en cuenta el tipo de material resistivo más conveniente para aumentar la protección de un ser humano.

3. Desarrollo del Sistema de Protección Contra Descargas Eléctricas en Espacios Abiertos

En este trabajo investigativo se presenta una solución viable, referenciada al apantallamiento de un campo abierto, buscando dar seguridad de los seres humanos, que se encuentren más específicamente en una cancha de entrenamiento de fútbol.

Se contará con los ítems a continuación expuestos para llegar al diseño de un prototipo; también se tendrán en cuenta efectos que pueden causar una descarga atmosférica cercana conocido como transferencia ya que no se puede garantizar la zona de impacto.

3.1.Sistema de Puesta a Tierra y sus Funciones

La finalidad de un sistema de puesta tierra es:

- El de brindar seguridad a las personas.
- Proteger las instalaciones, equipos y bienes en general, al facilitar y garantizar la correcta operación de los dispositivos de protección.
- Establecer la permanencia de un potencial de referencia, al estabilizar la tensión eléctrica a tierra, bajo condiciones normales de operación.

Los fenómenos fisiológicos que produce la corriente eléctrica en el organismo humano dependen del valor de la intensidad de la corriente, tiempo de duración del contacto, callosidad, sexo, estado de epidermis, peso, altura, estado de ánimo, estado del punto de contacto a tierra.

Las funciones de una puesta a tierra son:

- Garantizar condiciones de seguridad a los seres vivos.
- Permitir a los equipos de protección despejar rápidamente las fallas.
- Conducir y disipar las corrientes de falla con suficiente capacidad.
- En algunos casos, servir como conductor de retorno.

Las puestas a tierra deben cumplir los siguientes requisitos:

- a. Los elementos metálicos que no forman parte de las instalaciones eléctricas, no podrán ser incluidos como parte de los conductores de puesta a tierra. Este requisito no excluye el hecho de que se deben conectar a tierra, en algunos casos.
- b. Los elementos metálicos principales que actúan como refuerzo estructural de una edificación deben tener una conexión eléctrica permanente con el sistema de puesta a tierra general.
- c. Las conexiones que van bajo el nivel del suelo en puestas a tierra, deben ser realizadas mediante soldadura exotérmica o conector certificado para enterramiento directo y demás condiciones de uso conforme a la guía norma IEEE 837 o la norma NTC 2206.
- d. Para verificar que las características del electrodo de puesta a tierra y su unión con la red equipotencial cumplan con el presente Reglamento, se deben dejar puntos de conexión y medición accesibles e inspeccionables al momento de la medición. Cuando para este efecto se construyan cajas de inspección, sus dimensiones deben ser mínimo de 30 cm x 30 cm, o de 30 cm de diámetro si es circular y su tapa debe ser removible.
- e. No se permite el uso de aluminio en los electrodos de las puestas a tierra.
- f. En sistemas trifásicos de instalaciones de uso final con cargas no lineales, el conductor de neutro debe ser dimensionado con por lo menos el 173% de la capacidad de corriente de las cargas no lineales de diseño de las fases, para evitar sobrecargarlo.

Cuando por requerimientos de un edificio existan varias puestas a tierra, todas ellas deben estar interconectadas eléctricamente, según criterio adoptado de IEC-61000-5-2.

3.2. Materiales de Uso Resistivo

Todas las sustancias se oponen en mayor o menor grado al paso de la corriente eléctrica, esta oposición es llamada resistencia eléctrica. Los materiales que son buenos conductores de electricidad tienen una resistencia eléctrica muy baja, es por esto que en la búsqueda de un sistema de apantallamiento óptimo se debe pensar en factores importantes como lo es el medio en donde se encuentran el área de estudio, además de un manejo topográfico. Debido a que el tipo de suelo varía según condiciones atmosféricas, erosión, entre otros es importante el uso de equipos tecnológicos, como en este caso el telurómetro para dar una caracterización del medio (suelo) el cual entrega el valor resistivo del área que se intervenga.

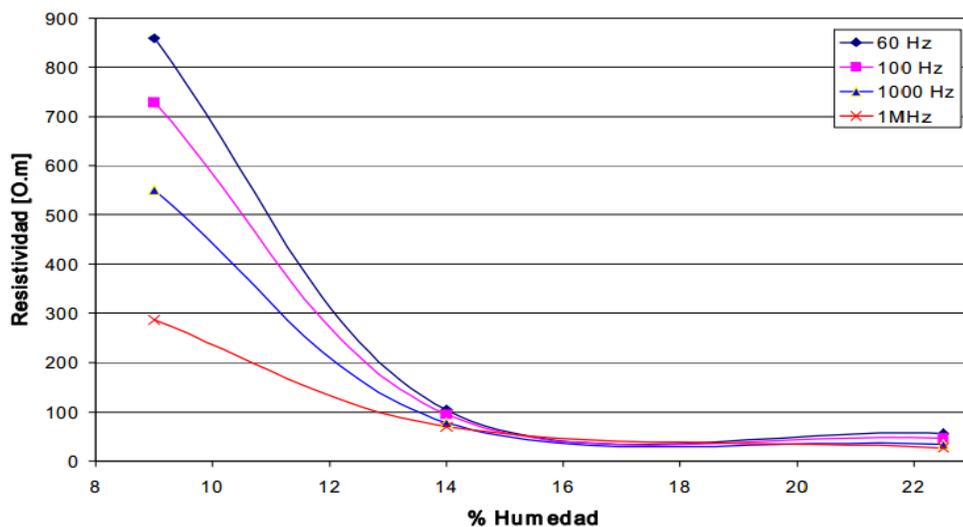
3.2.1. Aspectos Técnicos

El suelo es de naturaleza heterogénea; varía por su composición y según las condiciones del medio. Aunque se pueden clasificar de diversas formas los suelos, por ejemplo en arcilloso, arenoso y rocoso, no se puede atribuir una resistividad específica a un tipo de suelo, y sí se realizan mediciones que permiten encontrar diversos valores de resistividad. Se puede definir la resistividad del suelo, ρ , como la resistencia eléctrica entre las caras opuestas de un cubo de dimensiones unitarias (aristas = 1m) llenado con este suelo. Sus unidades serán Ωm .

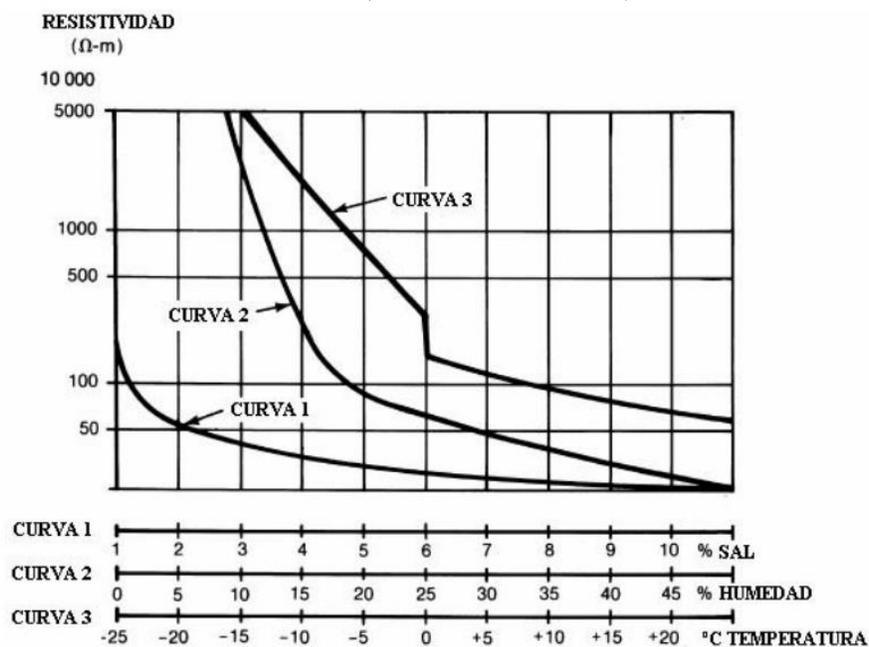
Varios factores influyen en la resistividad del suelo. Entre estos se destacan:

- Tipo de suelo.
- Mezcla de diversos tipos de suelos.
- Suelos con capas estratificadas a profundidades y materiales diferentes.
- Contenido de humedad.
- Temperatura.
- Compactación y presión.
- Composición y concentración de sales disueltas.
- Época del año.

La combinación de los anteriores factores da como resultado suelos con características diferentes y consecuentemente con valores de resistividad distinta. La conductividad del suelo es esencialmente electrolítica. Por esta razón la resistividad de la mayoría de los suelos aumenta abruptamente cuando el contenido de humedad es menor al 15% como se observa en la gráfica 3, curva 2. El contenido de humedad, adicionalmente, depende del tamaño del grano y compactación. Por otra parte, la resistividad varía con la frecuencia de la gráfica 1, aspectos que adquiere gran relevancia en presencia de fenómenos eléctricos muy rápidos como los rayos.



Gráfica 3. Variación de la resistividad del suelo con respecto a la humedad, ante diferentes frecuencias. (DISTRIBUCION, 2006)



Gráfica 4. Ilustración de variaciones de resistividad por diversos factores (DISTRIBUCION, 2006)

La composición y cantidad de sales solubles, ácidos o alcalinos presentes en el suelo pueden afectar considerablemente la resistividad. La gráfica 4, curva 1 muestra el efecto típico del contenido de sales sobre la resistividad.

- **Método de Wenner**

El método de los cuatro puntos de Wenner es el método más popular. Son razones para esto que el método obtiene la resistividad del suelo para capas profundas sin enterrar los electrodos a dichas profundidades; no es necesario un equipo pesado para realizar las medidas; los resultados no son afectados por la resistencia de los electrodos auxiliares a los huecos creados para hincarlos en el terreno.

Por dicha razón para el desarrollo de este proyecto, se utilizara un telurómetro, propiedad de la Universidad de la Salle, ya que cumple los requisitos mínimos para usar el método de Wenner.

Para usar el telurómetro, se enterrarán pequeños electrodos tipo varilla, en cuatro huecos en el suelo, a una profundidad “b” y espaciados a una distancia “a” como se muestra en la figura 7.

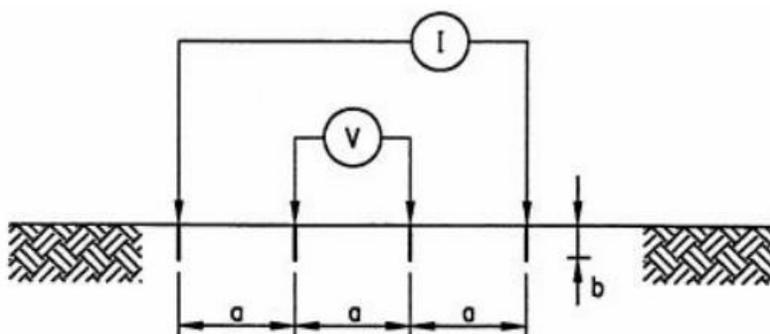


Figura 7. Ilustración de método de conexión de electrodos (DISTRIBUCION, 2006)

Una corriente se inyecta entre los electrodos externos y el potencial entre los dos electrodos siendo medido por el instrumento. La resistividad aparente del suelo a la profundidad, **a**, es aproximada por la siguiente ecuación 1:

$$\rho = \frac{4\pi Ra}{\left(1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}\right)}$$

Ecuación 1

Cuando “a” es mucho mayor que la profundidad de enterramiento “b”, la ecuación 1 se simplifica de la siguiente manera:

$$\rho = 2\pi Ra$$

Ecuación 2

3.2.2. Resistividad del Terreno

Para este caso la resistividad encontrada en la cancha de futbol de la universidad de La Salle sede norte fue:

$$\rho = 2 * \pi * 7,4m * 2,72 \Omega$$

$$\rho = 126,468 (\Omega \cdot m)$$

En relación a la resistividad del terreno en su estado normal es un mal conductor de la electricidad y totalmente seco se comporta como un material semiconductor o aislante. El valor de la resistividad efectuada para distintas rocas en límites muy amplios, dependiendo de la composición de las mismas, de la conductividad de sus partículas, de su estructura de la presencia de agua, de las sales y otros parámetros. La tabla que se indica a continuación, muestra los valores típicos de la resistividad del terreno:

Tabla 1 Fuente tierra soporte de la seguridad eléctrica – Fabio Casas primera edición pág. 63

Clase de terreno	P ($\Omega \cdot m$)
Tierra pantanosa	50
Tierra arcillosa húmeda	100
Tierra arcillo-arenosa húmeda	200
Tierra arenosa seca	1000
Tierra de arenisca dura	2000
Suelo con estrato de roca	10000

3.2.3. Material Resistivo

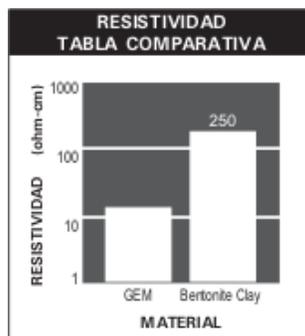
Comparando el valor de la resistividad obtenido en la cancha de futbol, se encontró que estamos trabajando con un terreno arcilloso y húmedo. Por lo tanto, para mejorar la resistividad eléctrica del terreno (suelo) se encontraron los siguientes productos:

- Intensificador de tierra: sirve para mejorar las condiciones del terreno haciendo bajar su resistividad y poder conseguir los valores bajos de R en el SPT.
- GEM Intensificador de Tierra: En muy raras ocasiones los diseñadores de sistemas de tierra y contratistas tienen la posibilidad de trabajar en suelos con buenas condiciones de aterrizaje. Aun en condiciones propicias la resistividad del suelo puede variar para determinadas áreas. Por esta razón se puede usar intensificador de tierra GEM (Ground Enhancement Material) para mejorar la efectividad de los sistemas de tierra. El intensificador de tierra GEM es

permanente, no requiere mantenimiento y tiene una resistividad hasta 20 veces menor que la bentonita, como se muestra en la gráfica 5.



Figura 8. GEM Intensificador de Tierra (ELECTRIC, s.f.)



Gráfica 5. Resistividad tabla comparativa (ELECTRIC, s.f.)

El GEM es un material no corrosivo, hecho a base de polvo de carbón y que posee una resistividad muy baja, lo que lo hace ideal para uso en suelos con una pobre conductividad. El GEM contiene cemento por lo cual endurece y no requiere mantenimiento. Adicionalmente el GEM es químicamente estable, no es agresivo con el medio ambiente y no requiere humedad para mantener su baja conductividad.

GEM Intensificador de tierra es efectivo ya que:

- El intensificador GEM reduce drásticamente la impedancia y resistividad del suelo.

- El intensificador GEM mantiene una resistencia constante durante la vida útil del sistema de tierra.
 - El intensificador GEM hace más eficiente el aterrizaje en temporadas secas.
 - El intensificador GEM es químicamente estable y la producción de sulfatos y ácido clorhídrico es muy bajo, esto se traduce en una mayor resistencia mecánica a la corrosión de los conductores (T, s.f.).
- **ELECTRIC-GEL:** es un Gel de comportamiento electro-dinámico, usado en el sector eléctrico como mejorador de resistencia e impedancia de puesta a tierra, debido a su característica tensión corriente y variación de impedancia en función de la frecuencia $Z(f)$ (a medida que entra energía su impedancia se reduce), disminuye el valor de resistencia de puesta a tierra.

ELECTRIC-GEL es un producto compuesto, elaborado a partir de biopolímeros conductores y sustancias aglutinantes que hacen de Electric-Gel® un transductor de energía, transformando la energía eléctrica en energía de desplazamiento y polarización molecular, adquiriendo un excelente comportamiento, como baja impedancia en función de la frecuencia $Z(f)$. Por esto puede ser considerado como un suelo conductor para puesta a tierra (ELECTRIC, s.f.).



Figura 9. ELECTRIC-GEL (ELECTRIC, s.f.)

3.3. Desarrollo de Protección Contra Descargas Eléctricas

Para el desarrollo del sistema de protección contra descargas eléctricas es importante obtener directamente los datos del terreno que se desea trabajar, debido a que como se

muestra en la tabla 1, existen distintos tipos de suelos, los cuales llegan a variar su resistividad. Para esto es importante adoptar el siguiente procedimiento:

- a) Consultar o determinar las características del suelo, especialmente la resistividad.

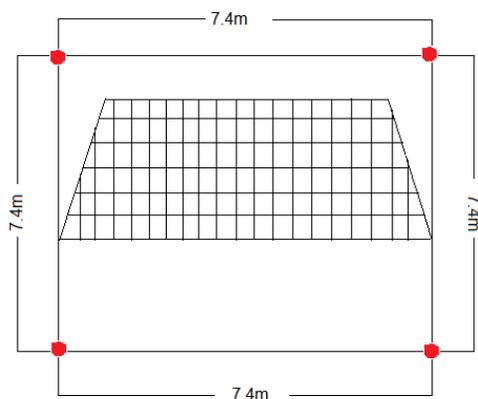


Figura 10. Área en la cual se determinó la resistividad cancha de fútbol (Universidad de La Salle- sede Floresta).

- b) Calcular la resistividad en el terreno en estudio. Con ayuda de la ecuación 2, se realiza el respectivo cálculo, para encontrar la resistividad por metro.

$$\rho = 2\pi aR$$

Ecuación 3

- c) Para la consideración del radio de protección que vamos a obtener con este apantallamiento se usa la expresión:

$$r = \sqrt{(2H - h)} \text{ Ecuación 4}$$

H: Es la distancia entre la base de la nube y el suelo (200-4000 metros), generalmente es 3000 m.

h: Altura del pararrayos.

r: radio de protección.

4. Modelamiento Sistema de Apantallamiento

Para determinar el modelo a implementar se hace un análisis de sistemas de protección externa. Los principios de protección que darán pautas en la búsqueda de los mejores criterios de diseño a tener en cuenta en espacios abiertos.

4.1. Sistemas de Protección Externa

El objetivo fundamental de un SPCR (Sistema de Protección Contra el Rayo) es el de proporcionar seguridad a una estructura contra descargas atmosféricas de rayo y a daños físicos y lesiones a los seres vivos debido a tensiones de paso y de contacto.

Según la tipología de dispositivos, la protección externa puede ser:

Protección activa: Pararrayos que por un medio u otro, emiten un flujo de iones dirigidos a la nube, aumentando la probabilidad de descarga sobre ellos.

Protección pasiva: Sistemas que no provocan el arco disruptivo (rayo), no aumentando la probabilidad de descarga en el edificio a proteger (acción preventiva) (Ingesco, 2013).

4.2. Modelo Propuesto

Se utilizará el método de TERMINAL DE TIERRA, más conocido en EEUU como CONTRAPESO, debido a que este sistema consiste de un anillo de cobre enterrado que rodea la estructura y/o barras de tierra verticales. Se requiere que la impedancia del terminal de tierra (es decir, después de una conexión de bajada) sea máximo de 10 Ohm. El aluminio no se permite para uso bajo tierra. Cada conductor de bajada debe tener su propio electrodo de tierra terminal y estos normalmente están conectados entre sí para formar un anillo, con electrodos horizontales usados para interconectarlos y ayudar a reducir la impedancia global.

Los terminales de tierra más comunes son barras de al menos 1,5 m de longitud, con un mínimo para cada sistema de 9 m. El anillo ayuda a lograr una ecualización de potencial en la superficie del suelo, además de controlar el potencial. Esto último ayuda a reducir la tensión de contacto que puede experimentar una persona en contacto con el conductor de bajada durante una descarga atmosférica.

Se complementará el sistema de protección con seis pararrayos, los cuales serán ubicados en cada una de las bases de las lámparas encargadas de la iluminación del campo

deportivo. Para la selección de estos pararrayos se contará con una idea base de los tipos de pararrayos que se presentan a continuación.

4.2.1 Modelo Propuesto con materiales y descripción

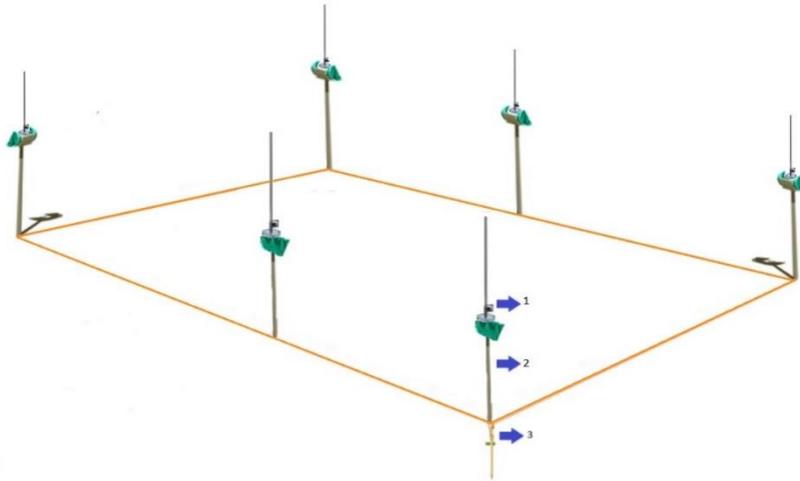


Figura 11. Modelo propuesto del sistema de apantallamiento. Fuente: elaboración propia

- 1) Conductor terminal aéreo “Pararrayos”
- 2) Poste de concreto de 8m -“sistema de iluminación”
- 3) Sistemas de puesta a tierra con anillo

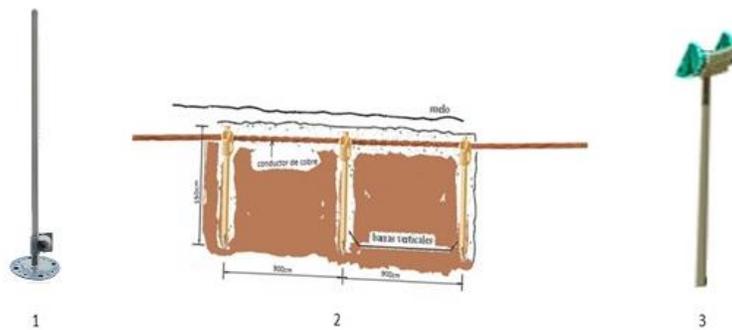


Figura 12. Componentes del sistema de apantallamiento propuesto. Fuente: elaboración propia

- 1) Conductor terminal aéreo “Pararrayos”
- 2) Distancia entre electrodos
- 3) Poste de concreto de 8m

El elemento protector que se escogió para este prototipo es un mástil (punta captadora tipo Franklin de un asta), este tiene entonces por finalidad atraer sobre sí la descarga y conducirla a tierra, de manera que genere una protección más conocida como “apantallamiento o blindaje” y constituye uno de los medios más utilizados para el control de los rayos.

Dejándose claro que la altura de la estructura será de 13 m de los cuales consta de poste de concreto de 8m y un mástil tipo Franklin de 5m; esta disposición da un buen grado de probabilidad de intercepción del rayo, y por lo tanto existirá un mayor grado de protección. Pero aun así se da la probabilidad de que el rayo no sea interceptado. Esta ocurrencia se denomina “falla del apantallamiento” por lo que una cierta probabilidad de falla del apantallamiento debe ser aceptada.

El pararrayo o mástil va a crear una zona de protección en todo el campo de futbol y así poder interceptar la descarga del rayo encaminándola hacia la tierra; es por esto que se hará una disposición de 6 pararrayos en la zona de protección (cancha de futbol), los cuales se colocarán en los lugares más altos, como se habla de campo de aplicación una cancha de futbol, ésta posee luminarias dispuestas en cada una de las esquinas y zona intermedia de la cancha las cuales servirán de base y a su vez bajantes que conectaran todo el sistema a una barrilla o anillo que está dispuesto alrededor de la cancha.

El anillo que se menciona ayuda a lograr una equalización de potencial en la superficie del suelo, además de controlar el potencial. Esto último ayuda a reducir la tensión de contacto que puede experimentar una persona en contacto con el conductor de bajada durante una descarga atmosférica. Este anillo se hace mediante varias conexiones al sistema perimetral de la cancha que mide entre 105 m de largo y 68 m de ancho (dependiendo de las dimensiones de la cancha de entrenamiento), estas tendrán las mismas longitudes y acomodadas simétricamente para conformar el anillo que será de cobre e irá enterrado de tal forma que la impedancia de terminal de tierra no sea máximo de 10 Ohm.

Finalmente la conexión entre los pararrayos y el anillo será mediante electrodos horizontales usados para interconectarlos y ayudar a reducir la impedancia global, como se debe usar el poste de iluminación como parte de la estructura y esta es usada para sostener las luminaria y ahora la punta captadora, en un principio contiene un cableado para el punto de energización de la luminaria que va por dentro del poste y es imposible meter por allí la bajante de la puesta a tierra por norma ya que no cumpliría con la NTC

4552-3, en este caso solo se tendría la opción de instalar el bajante externo y como se aumenta el riesgo de tensión de contacto hacia las personas que se encuentren cerca del poste se usara cable aislado que elimina las tensiones de contacto en el momento de la descarga, siendo necesario utilizar en el último tramo de 3.5m lo de más si puede usar los soportes y conexión que en un principio posee el descargador o punta tipo Franklin (alambrón con soporte)



Figura 13. Elementos del modelo de sistema de apantallamiento propuesto. Fuente: elaboración propia

1. Punta captadora Franklin de un asta
2. Alambroón de soporte
3. Poste de la luminaria
4. Cable aislado
5. Varilla de tierra interconectada (anillo)

Estos electrodos de tierra serán conectados entre sí mediante cintas de cobre de alta conductividad o conductores retorcidos (cables). La cinta es el material más conveniente pues para una sección dada de material presenta una mayor superficie y se considera que tiene un comportamiento mejor a alta frecuencia, ya que la capacitancia a tierra es mayor.

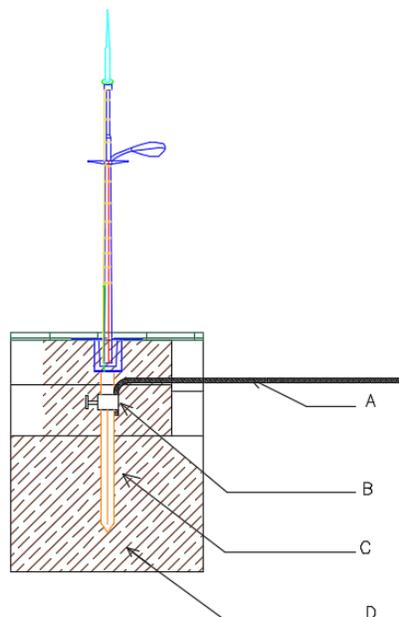


Figura 14. Elementos del sistema de apantallamiento propuesto conexión bajo tierra. Fuente: elaboración propia

- A. Conductor de tierra (cobre) 50mm^2 de $8\text{mm } \phi$
- B. Conector de Cobre, longitud de contacto a lo largo de la varilla 10mm mínimo
- C. Barra de Cobre 20mm de ϕ , longitud 1500mm mínimo
- D. Tierra cernida y tratada $R < 10$ ohmios

4.3. Sistema de captación esfera rodante

Para el desarrollo de este proyecto se seleccionó el modelo electrogeométrico (esfera rodante) para el diseño del apantallamiento de la cancha de fútbol debido a que este facilita la selección del radio a proteger (nivel de protección necesaria), además de que permite ubicar y dimensionar los dispositivos de captación para así adoptar la mejor opción.

Aplicando este método, el posicionamiento del sistema de captación es adecuado si no hay un punto de contacto entre el volumen a ser protegido con la esfera de radio r , rodando sobre la tierra, alrededor y sobre la estructura en todas las direcciones posibles. Por consiguiente, la esfera debe tocar únicamente la tierra y/o el sistema de captación.

El radio r de la esfera rodante depende de la clase de SIPRA según la tabla 2.

Tabla 2. Valores máximos del radio de la esfera rodante según el nivel de protección

Nivel de protección	Radio de la esfera (r_{sc}) [m]
Nivel I	35
Nivel II	40
Nivel III	50
Nivel IV	55

Fuente: (CERTIFICACION, Proteccion contra descargas electricas atmosfericas (rayo):Principios Generales. NTC 4552-3, 2008)

La aplicación del método de la esfera rodante aplica para todo tipo de estructuras o espacios ya que la esfera de radio r es rodada alrededor y sobre toda el área hasta que encuentre el plano de tierra o alguna estructura permanente o un objeto en contacto con el plano de tierra que sea capaz de actuar como un conductor de rayo. Un punto de impacto se puede presentar donde la esfera rodante toca el sistema de captación en tales puntos de protección.

El espacio de protección generado por un conductor de SIPRA es el volumen no penetrado por la esfera rodante cuando está en contacto con el conductor y aplicado al tipo de estructura.

En el caso de la esfera rodante cuando están ubicados paralelamente dos conductores del sistema de captación del SIPRA sobre el plano de referencia horizontal en la figura 15 se puede calcular la distancia de penetración p de la esfera rodante bajo el nivel de los conductores en el espacio entre los conductores como:

$$p = r - \left(r^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \text{ Ecuación 5}$$

La distancia de penetración p debe ser menor que ht menos la altura de los objetos a ser protegidos.

$$p = 55 - \left(55^2 - \left(\frac{54}{2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$p = 7 \text{ m}$$

Aplicando la ecuación 5 se tiene como resultado una distancia de 7 m de penetración, es decir, se tendrá una protección de 6m de altura base ya que entre más cerca del individuo a proteger mayor es la probabilidad de que este sobreviva ante un impacto. Teniendo en

cuenta los cambios de altura a los que se someten los jugadores es necesario dar un gap de altura extra ya que no se puede dejar desprotegido al jugador en esos instantes.

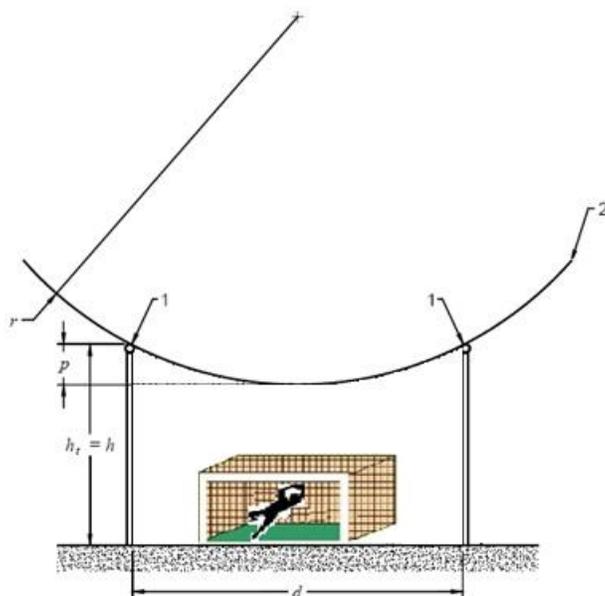


Figura 15. Espacio protegido por sistema de captación (esfera rodante) Fuente: elaboración propia

1) Sistema de captación

2) Efecto esfera rodante

ht Altura física de las varillas del sistema de captación sobre el plano de referencia

p Distancia de penetración de la esfera rodante

h Altura del sistema de captación de acuerdo con la Tabla 2

r Radio de la esfera rodante

d Distancia de separación de postes de captación

La distancia de penetración p de la esfera rodante debe ser menor que ht menos la mayor altura de los objetos a ser protegidos para así proteger los objetos ubicados dentro del sistema de captación.

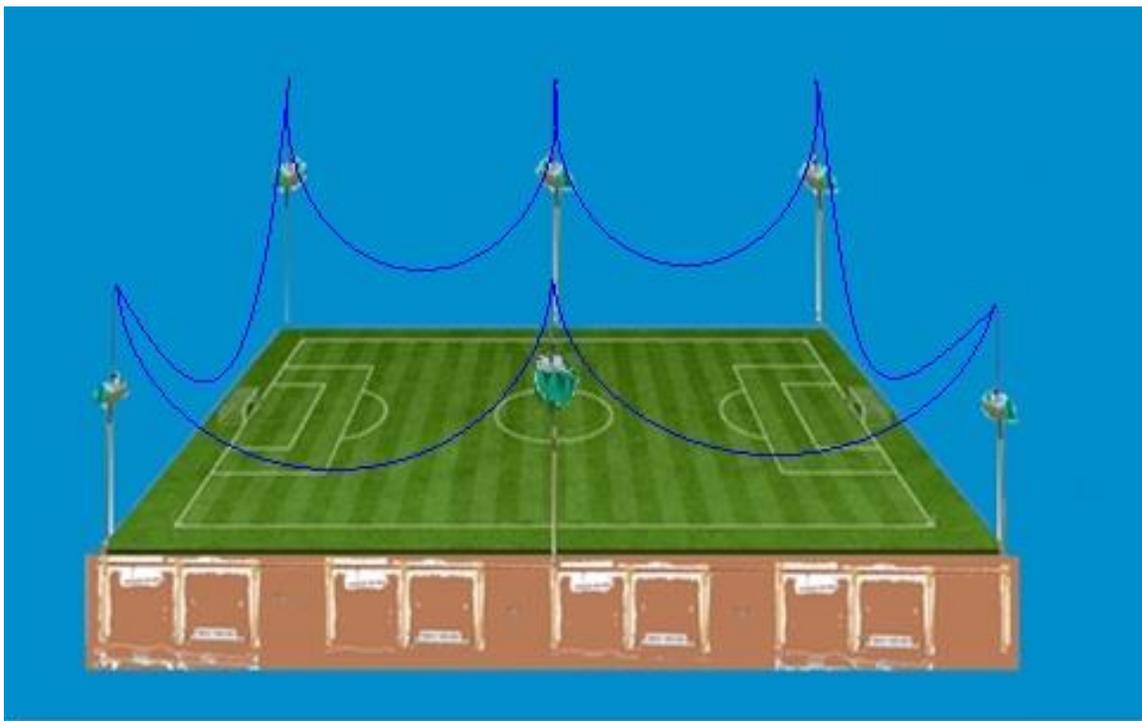


Figura 16. Diseño sistema de protección contra descargas atmosféricas (esfera rodante) vista lateral Fuente: elaboración propia

4.4. Validación del Modelo Propuesto

Uno de los efectos que puede causar una descarga eléctrica sobre el cuerpo humano es la fibrilación ventricular dado que la corriente que pasa por el corazón causa la pérdida de coordinación de las fibras musculares del órgano, deteniendo la circulación de la sangre y causando la muerte. Otro efecto es un paro respiratorio cuando la descarga eléctrica hace que los músculos el pecho del ser humano se contraiga al paso de la corriente.

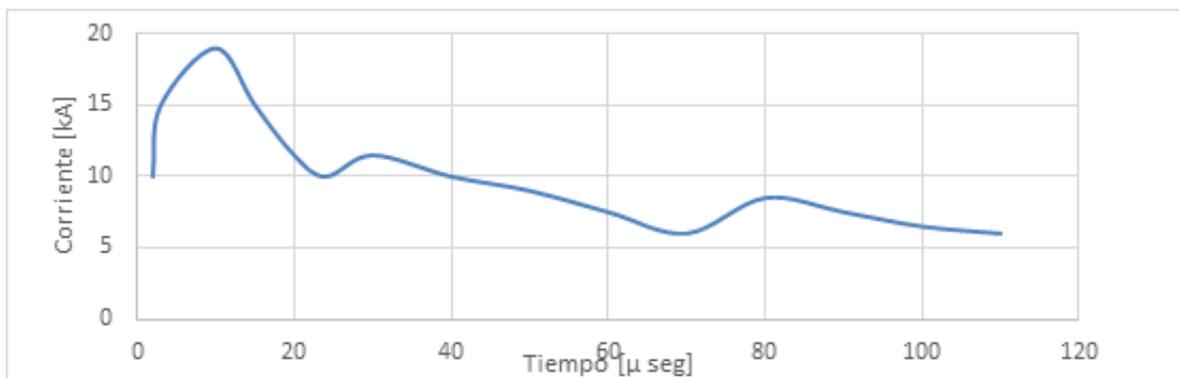
En un estudio hecho por Juan Carlos Arcioni en el año de 1987 se encontró que había cinco maneras de hacer daño a una persona en un campo abierto, las cuales son:

- 1) Impacto directo
- 2) Tensión de contacto
- 3) Impacto lateral
- 4) Tensión de paso
- 5) Auto descarga

Tabla 3 Datos1 impulso de una descarga atmosférica (Pando, 2006)

t [μ seg]	I [kA]
2	10
3	15
10	19
15	15
20	11,5
24	10
30	11,5
40	10
50	9
60	7,5
70	6
80	8,5
90	7,5
100	6,5
110	6

Fuente: Aspectos Básicos de las Descargas Atmosféricas (Pando, 2006)



Gráfica 6.Dato1 comportamiento Primer impulso de una descarga atmosférica (rayo) (Pando, 2006)

Tabla 4 Datos2 impulso de una descarga atmosférica (Pando, 2006)

t [μ seg]	I [kA]
3.8	19
80	8,5
(100	6,5
110	6
200	6
400	5,5
600	5
800	3
1000	2,8
1200	2,1
1400	1,5
1600	2
1800	1,5
2000	1
2200	0,5

Fuente: Aspectos Básicos de las Descargas Atmosféricas (Pando,2006)



Gráfica 7. Dato 2 comportamiento Primer impulso de una descarga atmosférica (rayo) (Pando, 2006)

Los valores que se pueden observar en la gráfica son:

- $IMÁX = 19 \text{ kA}$ • Tiempo para llegar a $IMÁX$, $t1 \approx 10 \mu\text{s}$
- Pendiente máxima (primer frente) $\Delta I/\Delta t = 14 \text{ kA}/2,5 \mu\text{s} = 5,6 \text{ kA}/\mu\text{s}$
- Tiempo de caída al 50% de $IMÁX$, $t2 \approx 54 \mu\text{s}$
- Tiempo hasta que I llega al valor aproximado de 200 a $t3 \approx 2,2 \text{ ms}$
- Carga eléctrica transportada en $t1$, $QS1 = \int I dt \approx 7 \text{ C}$
- Energía específica (entre 0 y 1300 s), $W/R = \int I^2 dt \approx 41.500 \text{ W}/\Omega$

También son posibles las descargas denominadas anormales o raras, sólo por ser menos frecuentes:

- Se propagan del suelo hacia la nube.
- Tienen impulso de polaridad positiva.
- Se producen desde un suelo casi sin nubes.

Otros fenómenos relacionados con cargas eléctricas en la atmósfera, tal como el de las centellas, fueron constatados mediante numerosos testimonios, pero no estudiados científicamente.

De acuerdo a estudios realizados es posible comprender lo que puede ocurrir y el estado en que pueda terminar un ser humano en un muy corto lapso de tiempo cuando recibe una descarga atmosférica directa y/o de transferencia. Por tal razón y por los pocos métodos de protección existentes y aptos para lugares determinados por tipo de topografía debido a que es importante comprender, determinar y tratar la composición del suelo para conocer la resistencia Óhmica y poder hacer una mejor planeación de diseño, es necesario buscar para Colombia la protección pronta para lograr proteger la vida humana, ya que segundo a segundo se expresa la muerte de una persona por descargas atmosféricas.

4.5. Modelo bioelectromagnético del Cuerpo Humano

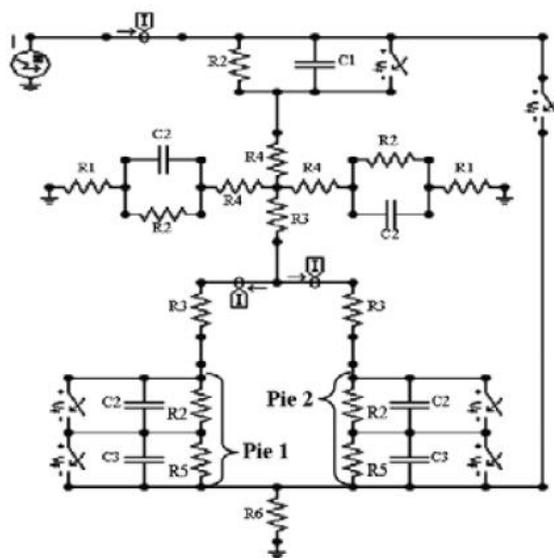
En los diferentes tipos de estudios realizados en el mundo (CEI/IEC, 1994-09) (UNE 20-572-92 PARTE1, 1984) (Mexicana, 2005) (Code, 1913), el cuerpo humano se puede ver como una resistencia de $1k\Omega$, siendo así un modelo eléctrico. Para ellos existe un modelo propuesto por Andrews, quien adicionó un elemento eléctrico para modelar los zapatos de una persona estando de pie, siendo R5 las ramas formadas por el resistor, el condensador C3 y un interruptor controlado por tensión como se muestra en la figura 15. En el modelo se trabajó para condiciones de baja humedad, de mayor humedad, como si se simulara un estado de lluvia.

Para condiciones de baja humedad (**modelo 1**) se consideraron unas resistencias superficiales del cuerpo R3 y R4 con valores a 300Ω y 200Ω respectivamente, y para el caso de mayor humedad (**modelo 2**) se consideraron valores de 20Ω para R3 y R4. Los valores de los tipos de elementos que se tuvieron en cuenta en la gráfica 1, se mostrarán en la tabla 5. A continuación se presentarán los parámetros eléctricos para cada uno de los modelos a los cuales se hace referencia en las simulaciones con el Software EMTP/ATP.

Tabla 5 Parámetros eléctricos para los modelos 1 y 2.

ELEMENTO	MODELO 1	MODELO 2
R1	1 G Ω	1 G Ω
R2	10 K Ω	10 K Ω
R3	300 Ω	20 Ω
R4	200 Ω	20 Ω
R5	10 M Ω	10 M Ω
R6	230 Ω	230 Ω
C1	10 μ f	10 μ f
C2	0.25 μ f	0.25 μ f
C3	100 pf	100 pf

Fuente: (Colciencias)-Oscar Díaz, Francisco Santamaría, Alexander Alarcón, Francisco Román

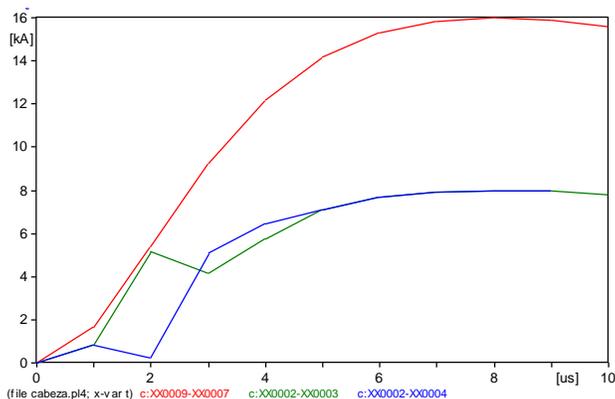


Fuente: (Colciencias)-Oscar Díaz, Francisco Santamaría, Alexander Alarcón, Francisco Román
 Figura 17 Circuito eléctrico del cuerpo humano propuesto por Andrews. C3 y R5 representan la impedancia del zapato, mientras que R6 es la impedancia de aterrizamiento de los zapatos. En el modelo 1, R3= 300 Ω y R4= 200 Ω y en el modelo 2, R3= R4= 20 Ω

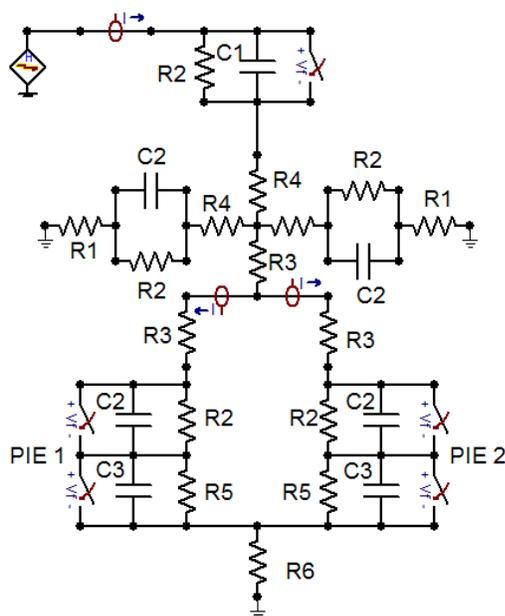
4.6. Simulaciones en el Software EMTP/ATP

El programa ATP, Alternative Transients Program, ayuda a crear y editar el modelo digital a simular, de forma interactiva. En el programa se puede construir un circuito eléctrico que para este caso es el comportamiento al que se ve expuesto todo ser humano en un campo abierto ante una descarga atmosférica. De acuerdo a lo anterior, se hace un

análisis de acción y reacción en el momento de la descarga que para este caso caerá directamente en la cabeza de los dos tipos de modelos anteriormente mencionados.



Fuente: (Colciencias)-Oscar Díaz, Francisco Santamaría, Alexander Alarcón, Francisco Román
Gráfica 8. Comportamiento del cuerpo humano ante una descarga. Simulación en ATP



Fuente: (Colciencias)-Oscar Díaz, Francisco Santamaría, Alexander Alarcón, Francisco Román
Figura 18. Circuito eléctrico del cuerpo humano propuesto por Andrews. C3 y R5 representan la impedancia del zapato, mientras que R6 es la impedancia de aterrizamiento de los zapatos. En el modelo 1, $R3= 300 \Omega$ y $R4= 200 \Omega$ y en el modelo 2, $R3= R4= 20 \Omega$

Como se logra ver en la gráfica 8, la descarga atmosférica cae directamente en el cuerpo humano haciendo que este busque amortiguar el impacto de la corriente. El cuerpo humano puede comportarse de distintas maneras, es por esto que en estudios realizados se toman valores estándar de una persona aproximada de 75Kg, en un estado de salud moderado con una estatura de 1,78 m donde se tiene en cuenta la resistencia muscular, la

cantidad de agua en el cuerpo para así comprender las partes en las que el ser humano mantiene reservas de energía y poder ser interpretadas en el modelo de simulación.

El comportamiento humano hace que el impacto sea fuerte en un cierto tiempo en las piernas (XX0002-XX0003 pierna derecha, XX0002-XX0004 pierna izquierda) debido a la cantidad de masa muscular y teniendo en cuenta que éstas están en contacto con el suelo donde hace que la corriente trate de irse por este nodo de referencia, pero así mismo se logra ver que la cantidad de corriente que fluye por el cuerpo es de gran proporción haciendo en porcentaje de vida muy bajo ya que en un corto de tiempo, el cuerpo y sobre todo el cerebro (XX0009-XX0007) puede que muera en su totalidad para un estado de coma inmediato.

4.7.Factor de Corrección Atmosférico

La corrección atmosférica sólo es aplicable a los aislamientos externos, debido a que éstos son los que están en contacto con el medio ambiente y por ende son afectados por sus condiciones, dando como resultado de éstos cambios en la rigidez dieléctrica de los aislamientos.

Nota: La norma IEC 60060-1 establece las reglas para la corrección atmosférica de tensiones de soportabilidad del aislamiento externo.

El factor de corrección atmosférico es definido a partir de la ecuación 3, en la cual se obtiene a partir del producto entre el factor de corrección en función de la densidad del aire y el factor de corrección en función de la humedad. Estas reglas para realizar las correcciones atmosféricas en los procedimientos de coordinación de aislamiento, se basan en medidas de altitudes de hasta 2000 m y su utilización en casos donde se tengan mayores altitudes, se debe realizar con cuidado. Por tanto, es de suma importancia tener en cuenta las siguientes recomendaciones adicionales:

- En el caso de los aisladores limpios y distancias de aire, las correcciones se deben hacer para las tensiones soportadas al impulso atmosférico y de maniobra de coordinación. En el caso en que los aisladores no se encuentren en óptimas condiciones de limpieza y necesiten pruebas de contaminación, es necesaria también una corrección de la tensión de soportabilidad de larga duración a frecuencia industrial.
- Para la determinación del factor de corrección atmosférica aplicable, es posible suponer que las consecuencias de la temperatura ambiente y humedad se cancelan

mutuamente. A partir de esto en el caso del cálculo de la coordinación de aislamiento solamente la presión del aire (correspondiente a la altitud del lugar), se debe tener en cuenta para aisladores secos y húmedos.

$$Kt = K1 * K2 \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

Kt: Factor de corrección atmosférico.

K1: Factor de corrección en función de la densidad del aire

K2: Factor de corrección en función de la humedad

Con respecto al factor de corrección en función de la densidad del aire, k1, se tiene lo siguiente en la ecuación 5.

$$K1 = \delta^m \quad \text{Ecuación 7}$$

δ : Densidad relativa del aire

m: Valor del exponencial

Es posible asumir el factor de corrección en función de la humedad $k2=1$, ya que la humedad y la temperatura se mantienen constantes e idénticas a los valores de las condiciones atmosféricas estandarizadas, por lo tanto la expresión que determina el factor de corrección atmosférico, se presenta en la ecuación 7.

$$Kt = K1 = \left(\frac{b}{bo}\right)^m \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

b: Presión atmosférica en el sitio donde se instalará el equipo.

bo: Presión atmosférica para condiciones estandarizadas [kPa]

m: Valor del exponencial

4.7.1. Factor de Corrección por Altitud

Inicialmente hay que tener en cuenta varios parámetros, los cuales son:

- Para instalaciones que se encuentren a altitudes hasta de 1000 m.s.n.m, el factor de corrección por altura, deberá corresponder a la altura de 1000 m.s.n.m, debido

a que los aislamientos de los equipos sólo están normalizados hasta ese punto (IEC 60694 (2002)).

- En el caso que se tengan altitudes mayores a 1000 m.s.n.m, el factor de corrección por altura, deberá corresponder a la altura total de la instalación.
- Las distancias Fase-Fase y Fase-Neutro, deberá corresponder a las distancias establecidas por la norma IEC 60071-2 para el nivel de aislamiento finalmente seleccionado.

Se tienen evidencias que muestran que la presión del aire tiene un comportamiento exponencial decreciente con la altura. Debido a esto y en consecuencia, la rigidez dieléctrica del aislamiento igual tendrá un comportamiento similar al comportamiento de la presión del aire (exponencial decreciente). A partir de esto es posible sugerir una expresión a partir de la cual se planteen un factor que muestre como disminuye la rigidez dieléctrica del aislamiento en función de la altura. Esta expresión corresponde a la ecuación 8 (GALLEGO, 2013)

$$Ka' = e^{-m\left(\frac{H}{8150}\right)} \text{ Ecuación 9}$$

Donde:

Ka': Corresponde al factor de decrecimiento de la rigidez dieléctrica del aislamiento.

H: Altura sobre el nivel del mar, m.

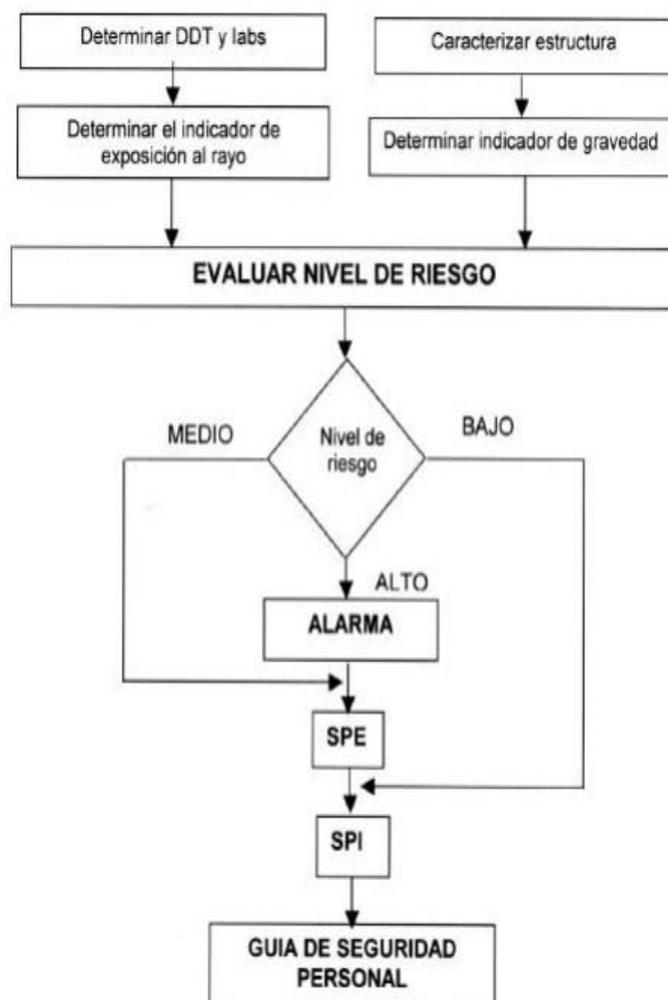
5. Diseño básico del sistema de protección externa contra descargas eléctricas atmosféricas en campo abierto.

El diseño del sistema de protección contra descargas eléctricas atmosféricas consta de los siguientes pasos:

- Evaluación nivel de riesgo para la estructura.
- Diseño del sistema de captación.
- Diseño sistema de bajantes.
- Revisión sistema de puesta a tierra.

5.1. Evaluación nivel de riesgo y de protección contra descargas eléctricas atmosféricas en campo abierto.

Para la evaluación del nivel de riesgo se tomó como base el siguiente diagrama de flujo, el cual evalúa el nivel de riesgo y establece las acciones de protección.



Fuente: (CERTIFICACION, Protección Contra Descargas Eléctricas Atmosféricas (rayos): Principios Generales. NTC 4552., 2008)

Figura 19. Evaluación del Riesgo Figura tomada

Primero se determina la densidad de descargas a tierra con base a la Norma Técnica Colombiana (NTC 4552-1) que nos indica en la siguiente tabla que la DDT para Bogotá es de 1. (Ver tabla 6).

Tabla 6 Densidad de descargas a tierra para algunas ciudades de Colombia

CIUDAD	LATITUD	LONGITUD	DDT PROMEDIO
Barranquilla	10,9	-74,8	1
Cartagena	10,5	-75,5	2
Corozal	9,3	-75,3	3
El Banco	9,1	-74	10
Magangue	9,3	-74,8	5
Monteria	8,8	-75,9	2
Quibdo	5,7	-76,6	9
Sta. Marta	11,1	-74,2	2
Tumaco	1,8	-78,8	1
Turbo	8,1	-76,7	5
Valledupar	10,4	-73,3	2
Riohacha	11,5	-72,9	2
Armenia	4,5	-75,8	2
Barranca	7	-73,8	7
Bogota	4,7	-74,2	1
Bucaramanga	7,1	-73,1	1
Cali	3,6	-76,4	1
Cucuta	7,9	-72,5	1
Girardot	4,3	-74,8	5
Ibague	4,4	-75,2	2
Ipiales	0,8	-77,6	1
Manizales	5	-75,5	2
Medellin	6,1	-75,4	1
Neiva	3	-75,3	1
Ocana	8,3	-73,4	2
Pasto	1,4	-77,3	1
Pereira	4,8	-75,7	4
Popayan	2,4	-76,6	1
Remedios	7	-74,7	12
Vcencio	4,2	-73,5	1
Bagre	7,8	-75,2	12
Samana	5,4	-74,8	9

Fuente: (CERTIFICACION, Protección Contra Descargas Eléctricas Atmosféricas (rayos) NTC 4552-1., 2008)

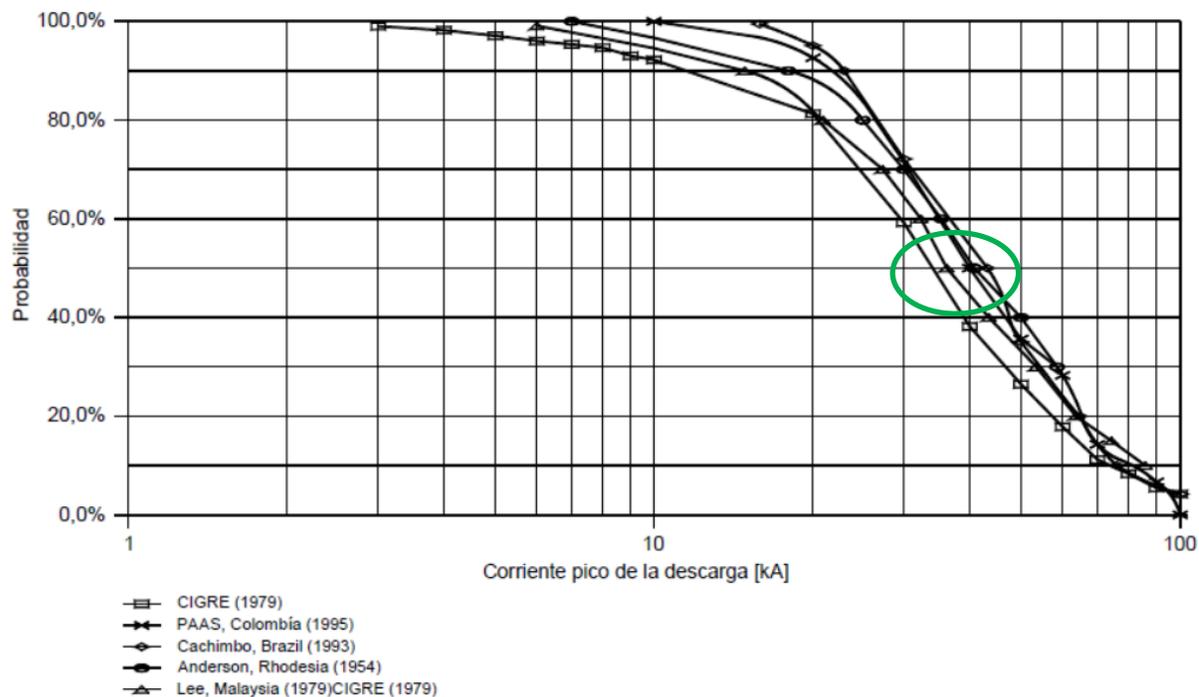


Fuente: (CERTIFICACION, Protección Contra Descargas Eléctricas Atmosféricas (rayos): Principios Generales. NTC 4552., 2008)

Figura 20. Mapa Colombiano de niveles cerámicos

“Para cada nivel (NPR) se genera un sistema fijo de parámetros máximos y mínimos de corriente de rayo. Los valores máximos de los parámetros de corriente de rayo del nivel I (NPR) se reducen a 75% para el nivel II, ya 50% para los niveles III y IV. Los parámetros del tiempo no cambian” (CERTIFICACION, Protección Contra Descargas Eléctricas Atmosféricas (rayos) NTC 4552-1., 2008) pg.16

Para encontrar la I_{abs} de acuerdo a la gráfica 9 tomada de la Norma Técnica Colombiana NTC 4552-1, se observa que para el nivel IV la corriente se reduce al 50% lo cual indica que la corriente I_{abs} es: 40 kA con una tolerancia de $\pm 10\%$.



Fuente: (CERTIFICACION, Protección Contra Descargas Eléctricas Atmosféricas (rayos) NTC 4552-1., 2008)

Gráfica 9. Determinación de la corriente máxima de la descarga.

En una primera fase el canal se propaga desde la nube hasta tierra en una serie de pasos discretos. El canal se ha iniciado en el interior de la nube a partir de un proceso preliminar de ruptura dieléctrica, aunque no existe en la actualidad un acuerdo sobre la forma exacta y localización de este proceso. El canal se propaga a una velocidad media de aproximadamente $2 \cdot 10^5$ m/s. La corriente media del canal se encuentra entre 100 y 1000 A. Mientras la punta del canal se acerca a tierra, el campo eléctrico en objetos puntiagudos de tierra o en irregularidades de la superficie aumenta hasta que ocurre la ruptura dieléctrica del aire. En ese momento se inician descargas desde esos puntos hasta que contactan con el canal. Una vez el canal ha contactado con tierra, comienza a descargarse por medio de una onda ionizante que se propaga hacia la nube a lo largo del canal previamente ionizado. Este proceso se conoce como primera descarga de retorno. La velocidad de la corriente de retorno del rayo típicamente toma valores de $1/3$ a $1/2$ de la velocidad de la luz en el vacío, y decrece con la altura. El tiempo total transcurrido en la propagación de tierra a la nube es del orden de $70 \mu\text{s}$. La primera descarga de retorno produce un pico de corriente del orden de 30 kA (Parámetros, 2016).

Tabla 7. Medianas del valor pico de la corriente de retorno del rayo en diferentes zonas del planeta (Adaptado de Lee et. Al. 1979).

País	Mediana (kA)
Estados Unidos	23
Suiza	30
Suecia	30
Polonia	31
Malasia	36
Brasil	43
Rodesia	42
Colombia	43

Fuente: (CERTIFICACION, Protección Contra Descargas Eléctricas Atmosféricas (rayos) NTC 4552-1., 2008)

De acuerdo a la DDT y la Iabs seleccionada se procede a buscar el indicador de parámetro del rayo

Tabla 8. Indicador de parametro del rayo.

Densidad de descargas a tierra [Descargas/km ² - año]	Corriente pico absoluta promedio [kA]		
	$40 \leq I_{abs}$	$20 \leq I_{abs} < 40$	$I_{abs} < 20$
$30 \leq DDT$			
$15 \leq DDT < 30$			
$5 \leq DDT < 15$			
$DDT < 5$			

	Severos		Altos
	Medios		Bajos

Fuente (CERTIFICACION, Protección Contra Descargas Eléctricas Atmosféricas (rayos): Principios Generales. NTC 4552., 2008)

5.2. Indicador de Gravedad

Tabla 9. Subindicador relacionado con el uso de la estructura.

Clasificación de estructuras	Ejemplos de estructura	Indicador
A	Teatros, centros educativos, iglesias, supermercados, centros comerciales, áreas deportivas al aire libre, parques de diversión, aeropuertos, hospitales, prisiones	40
B	Edificios de oficinas, hoteles, viviendas, grandes industrias, áreas deportivas cubiertas.	30
C	Pequeñas y medianas industrias, museos, bibliotecas, sitios históricos y arqueológicos	20
D	Estructuras no habitadas	0

Fuente (CERTIFICACION, Protección Contra Descargas Eléctricas Atmosféricas (rayos): Principios Generales. NTC 4552., 2008)

Tabla 10. Subindicador relacionado con el tipo de estructura

Tipo de estructura	Indicador
No metálica	40
Mixta	20
Metálica	0

Fuente (CERTIFICACION, Protección Contra Descargas Eléctricas Atmosféricas (rayos): Principios Generales. NTC 4552., 2008)

Tabla 11. Subindicador relacionado con la altura y el área de la estructura.

Altura y área de la estructura	Indicador
Área menor a 900 m ²	
Altura menor a 25 m	5
Altura mayor o igual a 25 m	20
Área mayor o igual a 900 m ²	
Altura menor a 25 m	10
Altura mayor o igual a 25 m	20

Fuente (CERTIFICACION, Protección Contra Descargas Eléctricas Atmosféricas (rayos): Principios Generales. NTC 4552., 2008)

$$IG = I_{USO} + IT + IAA \text{ Ecuación 10}$$

En donde

I_{USO} = subindicador relacionado con el uso de la estructura

IT = subindicador relacionado con el tipo de estructura

IAA = subindicador relacionado con la altura y el área de la estructura

Sumando los valores de los subindicadores relacionados con la estructura, como son el uso, el tipo y la combinación de altura y área, de acuerdo con las tablas 9, 10 y 11 se obtiene el indicador de gravedad IG de la tabla 12 que se puede presentar en la estructura. Por lo tanto para obtener el indicador de gravedad se suman los subindicadores relacionados con el uso, tipo y geometría de la estructura.

Tabla 12. Indicador de gravedad .

Resultado de la suma de subindicadores de estructura	Indicador de Gravedad
0 a 35	Leve
36 a 50	Baja
51 a 65	Media
66 a 80	Alta
81 a 100	Severa

Fuente (CERTIFICACION, Protección Contra Descargas Eléctricas Atmosféricas (rayos): Principios Generales. NTC 4552., 2008)

Finalmente el nivel de riesgo en un campo abierto teniendo en cuenta los subindicadores relacionados anteriormente, se evidencia la severidad del riesgo presente.

Tabla 13. Matriz de niveles de riesgo.

GRAVEDAD \ PARÁMETROS	Severa	Alta	Media	Baja	Leve
Severo					
Alto					
Medio					
Bajo					

Nivel de Riesgo de la estructura

	ALTO
	MEDIO
	BAJO

Fuente (CERTIFICACION, Protección Contra Descargas Eléctricas Atmosféricas (rayos): Principios Generales. NTC 4552., 2008)

6. Sistema de Apantallamiento Contra Descargas Eléctricas Atmosféricas – Aplicación del Modelo Propuesto

En este capítulo se presenta el caso de estudio visto como una aplicación de campo, explicando cada uno de sus componentes, descripción geográfica, características del terreno de estudio, método a usar para una visión profunda de la necesidad de implementar una protección donde el índice de exposición ante una afectación atmosférica es alto.

6.1. Descripción del Caso de Estudio

Se realizó el análisis de un sistema de apantallamiento para la cancha de futbol de la universidad de La Salle sede la floresta la cual presenta las siguientes características:

- Ubicación: Zona nororiental

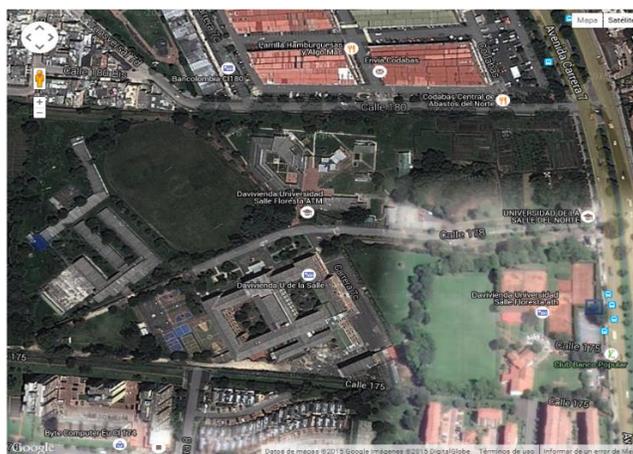


Figura 21. Universidad De La Salle Sede Norte - Calle 175, Bogotá, Colombia; imagen tomada de Google Earth

- **Dimensiones del área de estudio:** El sistema perimetral de la cancha mide entre 105 m de largo y 68 m de ancho



Figura 22. Cancha de futbol Universidad De La Salle Sede Norte - Calle 175, Bogotá, Colombia; imagen tomada de Google Earth

- **Resistividad del terreno**

Para nuestro caso la resistividad encontrada en la cancha de futbol de la universidad de La Salle sede norte fue:

$$\rho = 2 * \pi * 7,4m * 2,72 \Omega$$

$$\rho = 126,468 (\Omega\text{-m})$$

- **Clase de terreno:** se encontró que estamos trabajando con un terreno arcilloso y húmedo.

6.2. Modelo Propuesto Definitivo en la aplicación del caso de estudio.

El modelo del sistema de apantallamiento, aplicado para una cancha de futbol será el siguiente:

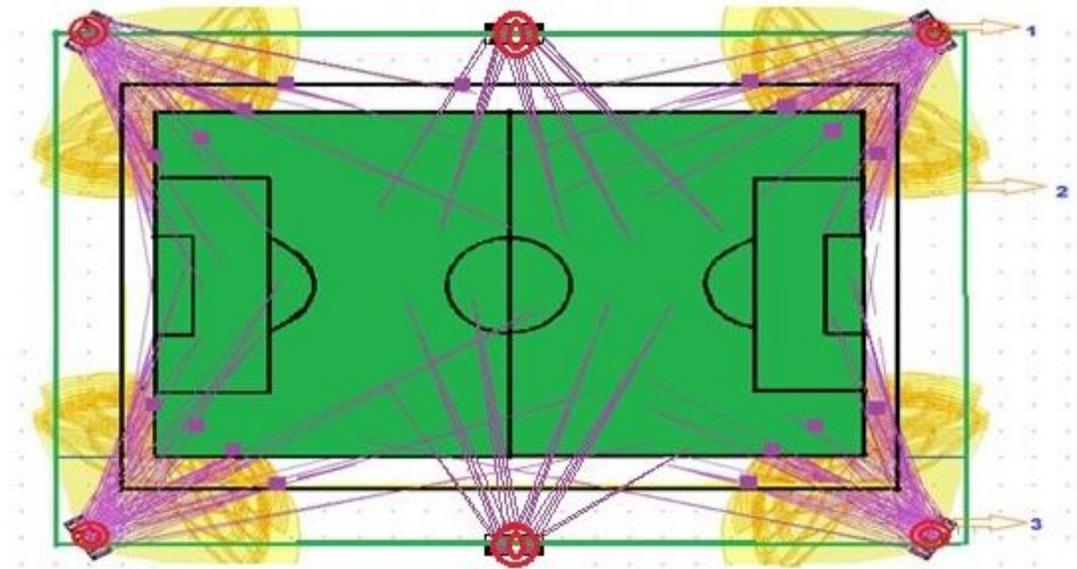


Figura 23. Vista superior junto con componentes del sistema de apantallamiento propuesto. Fuente: elaboración propia.

- 1) Conductor terminal aéreo “Pararrayos”
- 2) Sistemas de puesta a tierra con anillo
- 3) Luminarias o reflectores “bajantes”

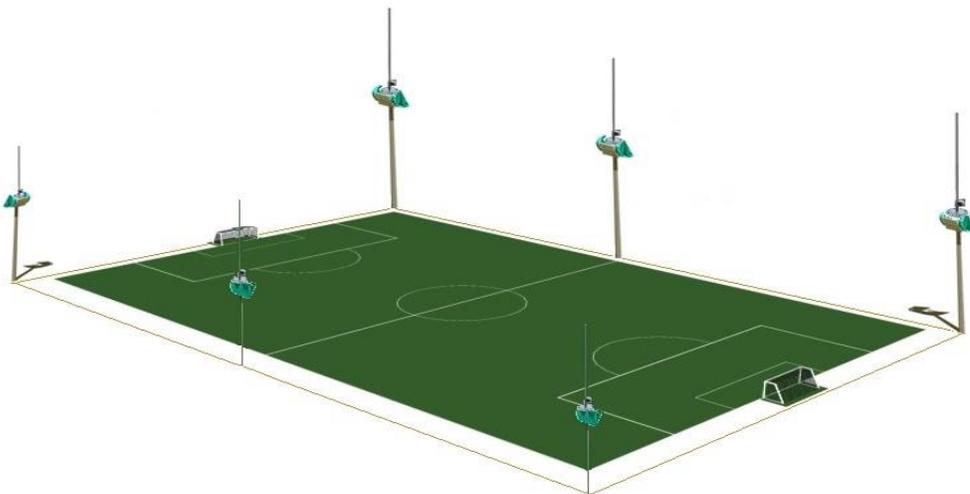


Figura 24. Modelo de aplicación del sistema de apantallamiento propuesto definitivo. Fuente: elaboración propia.

La conexión entre los pararrayos y el anillo será mediante electrodos horizontales usados para interconectarlos. A continuación se presentan la figura 25 y figura 26 que da ejemplo del sistema dispuesto alrededor de la cancha.

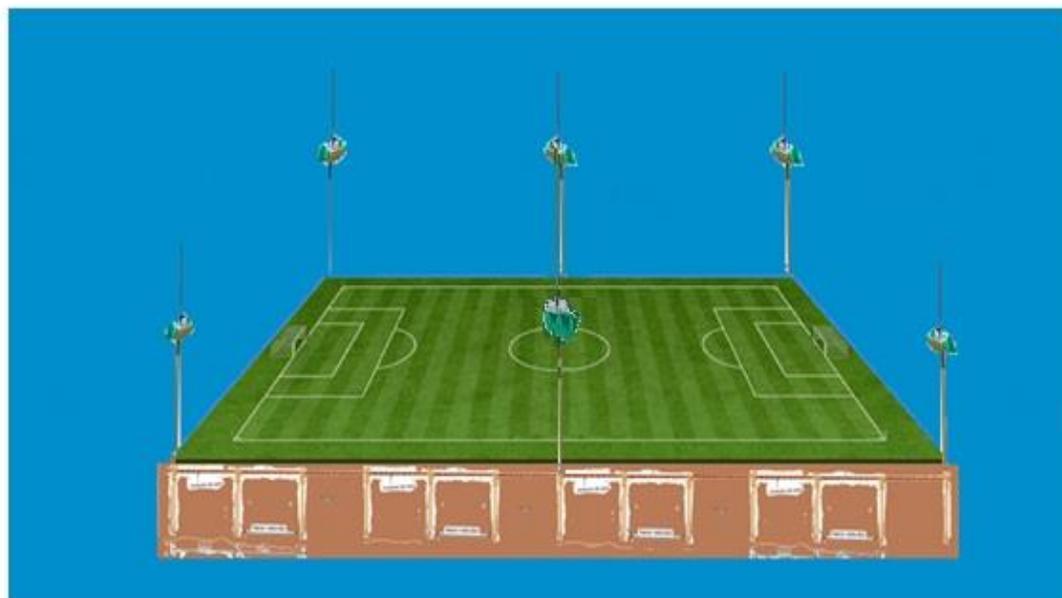


Figura 25. Conexión pararrayos y anillo en tierra interconectados vista lateral de la cancha de fútbol. Fuente: elaboración propia.



Figura 26 Conexión anillo en tierra interconectada vista frontal de la cancha de fútbol. Fuente: elaboración propia.

En las figuras 25 y 26 se muestra la manera como se han de disponer cada uno de los elementos para que se cumpla con el objetivo de salvaguardar vidas humanas.

La figura 27 recrea un sistema de apantallamiento aplicado a un espacio abierto en donde la franja amarilla que se alcanza a distinguir alrededor de la zona a apantallar es el anillo que interconecta los descargadores con todo lo que conlleva hacer una disposición en campo anteriormente mencionado

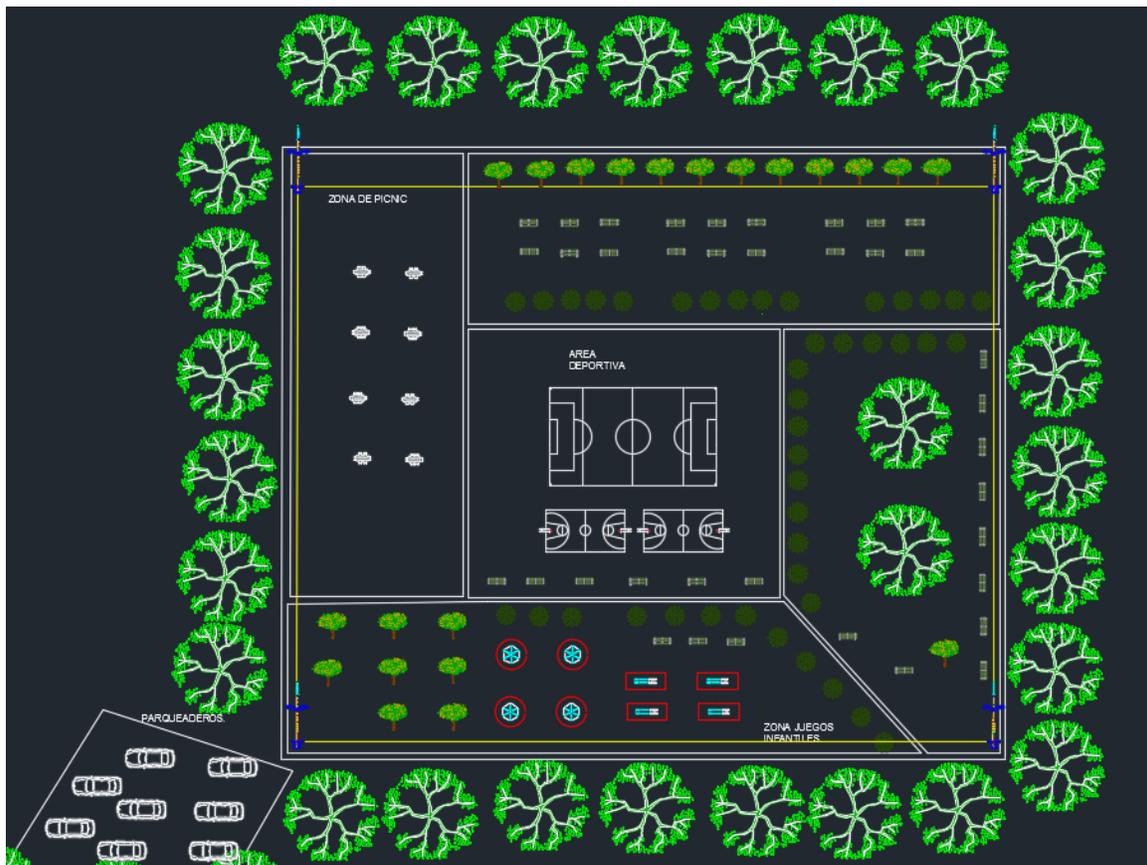
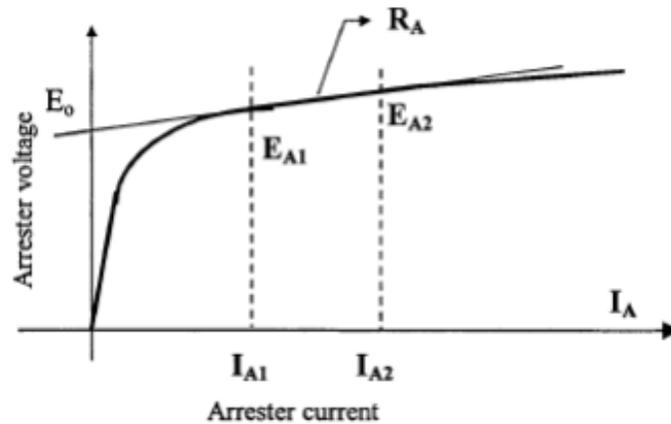


Figura 27. Ejemplo de un sistema de apantallamiento aplicado a un espacio abierto. Fuente: elaboración propia.

6.3. Tensión y Corriente en Pararrayos

Los valores de las tensiones y corrientes EA1 y EA2 e IA1 y IA2, se determinan a partir de las tablas suministradas por los fabricantes en cuanto a las características del pararrayos y con base a la gráfica 8.



Gráfica 10. Característica pararrayos- IEEE Std 1313.2-1999.Simplified method.

Para el cálculo de la resistencia del pararrayos R_A , se emplea la expresión:

$$R_A = \frac{EA_2 - EA_1}{IA_2 - IA_1} \text{ Ecuación 11}$$

Seguidamente se calcula la tensión E_0 :

$$E_0 = Ed - IARA \text{ Ecuación 12}$$

Teniendo en cuenta lo anterior, es posible entrar a calcular IA , correspondiente a la corriente que circula por el pararrayos mediante la expresión:

$$IA = 1.6 \frac{\frac{2E}{Z} - EA}{\frac{Z}{n}} = 1.6 \frac{\frac{2E}{Z} - E_0 - VPF}{\frac{Z}{n}} \text{ Ecuación 13}$$

Donde:

Z: Impedancia característica.

n: Número de objetos a proteger.

La tensión de descarga del pararrayos se halla teniendo en cuenta la expresión previamente analizada (ecuación anterior), pero despejando el término Ed y empleando el nuevo valor de corriente y la tensión E_0 .

$$Ed = E_0 + IARA \text{ Ecuación 14}$$

6.4. Tensión en la Unión Pararrayos - Barra

En el punto de unión entre el pararrayos y la barra se presenta una tensión denominada EJ, la cual es determinable a partir de la siguiente expresión

$$Ej = EA \left(1 + \frac{A}{1 + \frac{B}{K2}} \right), K2 = \frac{STA}{EA} \text{ Ecuación 15}$$

Para determinar la tensión fase – tierra total en la unión pararrayos-barra se emplea la siguiente expresión:

$$Ej = Ej - VPF \text{ Ecuación 16}$$

Tabla 14 Relación de voltaje – corriente de dps (dispositivo de protección contra sobretensiones)

I(kA)	V(kV)
1.5	26
3	28
5	29.5
10	32
20	37.5
40	43.5

Fuente: (Colciencias)-Oscar Díaz, Francisco Santamaría, Alexander Alarcón, Francisco Román

La anterior característica fue realizado por el fabricante a una onda determinada de impulso, normalmente una onda 8/20 μ s.

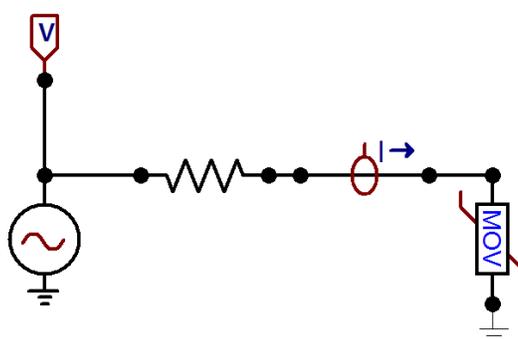
6.5. Prueba de Pararrayo a Baja Frecuencia – Alta Frecuencia

Para entender más de fondo el uso de pararrayos, es importante realizar una prueba modelo del pararrayos a baja frecuencia, donde se aproxima la curva de tensión – corriente a una curva de segmentos exponenciales consecutivos que empatan uno con otro de acuerdo a la siguiente expresión:

$$i = p \left(\frac{v}{v_{ref}} \right)^q \text{ Ecuación 17}$$

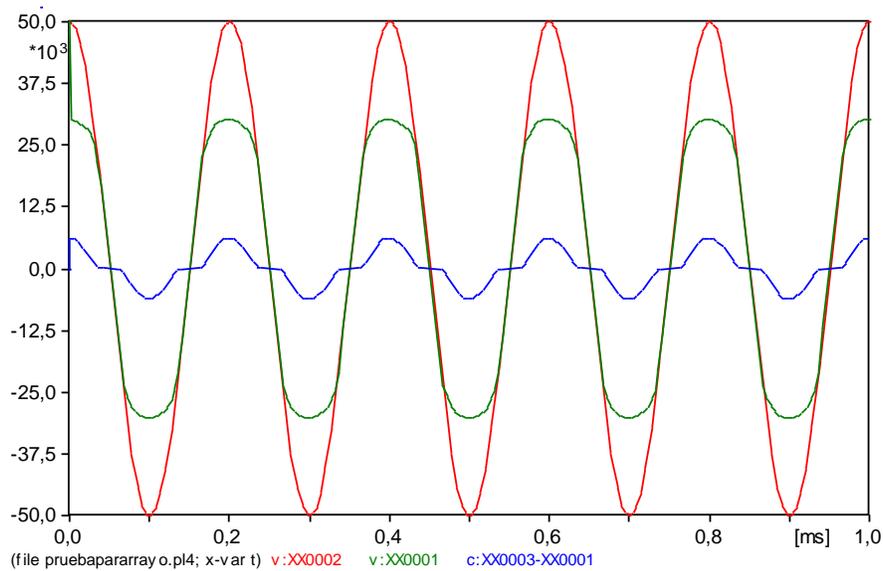
De acuerdo a la precisión escogida el ATPdraw determina el número de segmentos exponenciales. Para ellos el software determina 2 segmentos exponenciales en la mayoría de los pararrayos.

Para poder realizar la prueba de pararrayos, es necesario realizar el montaje de la simulación 1 para lograr verificar su correcta operación donde la resistencia se usa para limitar la corriente. El voltaje que se debe asignar a la fuente debe ser suficiente para hacer que el pararrayos actúe, para que como mínimo se llegue al voltaje residual.



Fuente: Universidad Nacional de Colombia, Leonardo Cardona Correa.
Figura 28. Montaje de simulación 1 software ATPdraw

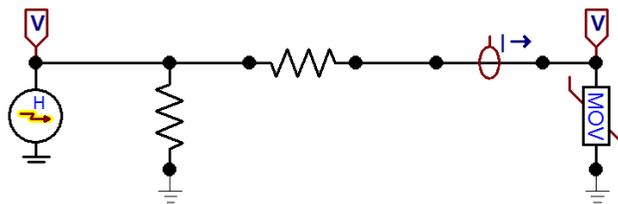
De acuerdo a la gráfica 11 de la simulación se puede observar que el impacto de tensión y el impacto de corriente, la reducción que el pararrayos comienza a dar debido a la onda de impulso a baja frecuencia, se ve claramente que es viable el uso de este sistema debido a que la magnitud a la que se ve recibida y la reducción casi total de este choque atmosférico al sistema de pararrayos, hace que sea una solución aplicada a nuestro campo abierto para la protección de los jugadores debido a que sea más tolerante y no un choque directo hacia la persona.



Fuente: Universidad Nacional de Colombia, Leonardo Cardona Correa.

Gráfica 11. Resultado gráfica de simulación 1 (impacto de tensión y corriente) software ATPdraw

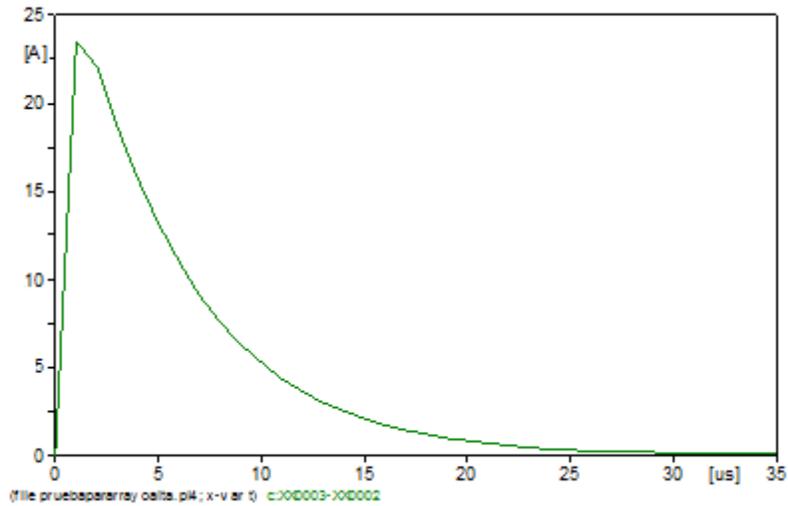
Para esta prueba se considera que la fuente de excitación es una función impulso de corriente de 10 kA a 8/20 μ s. Para ellos se usa un impulso tipo Heidler.



Fuente: Universidad Nacional de Colombia, Leonardo Cardona Correa.

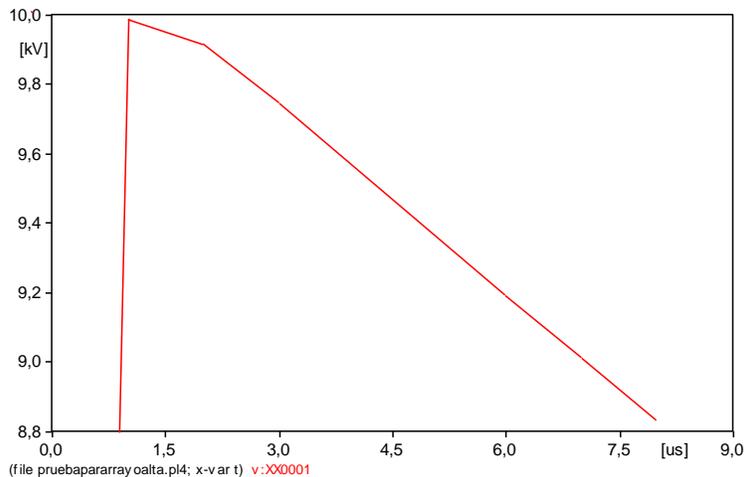
Figura 29. Montaje de simulación impulso tipo Heidler, software ATPdraw

Para este tipo de sistema a alta frecuencia se tiene en cuenta una resistencia de 500 Ohm y una de 0.001 Ohm.



Fuente: Universidad Nacional de Colombia, Leonardo Cardona Correa.
Gráfica 12. Forma de Onda de la corriente sobre pararrayos a alta frecuencia software ATPdraw

Como se puede observar en la gráfica 12, se puede determinar el impacto al que esta descarga atmosférica a alta frecuencia está alimentando al pararrayos para hacer efectivo su disparo, donde a los 25 A, el pararrayos hace que la corriente disminuya a un determinado tiempo más corto que como se puede observar en la gráfica de tensión donde la amplitud es mucho más alta a un determinado tiempo siendo este más forzado a disminuir. Validándose el uso del pararrayos tipo Franklin donde, la protección de la vida humana si es posible ante descargas atmosféricas.

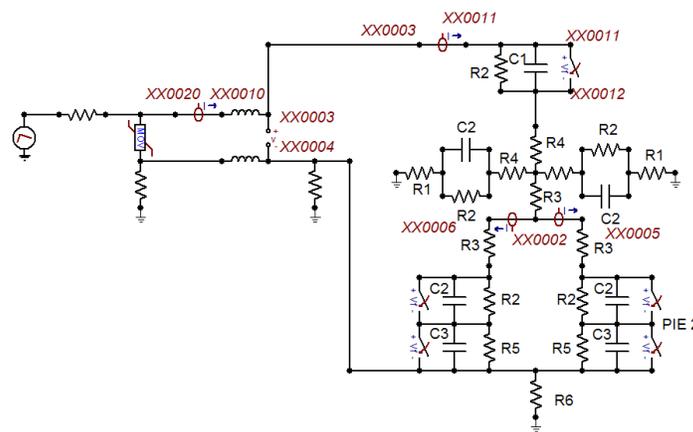


Fuente: Universidad Nacional de Colombia, Leonardo Cardona Correa.
Gráfica 13. Forma de Onda de la tensión sobre pararrayos a alta frecuencia software ATPdraw

6.6. Efecto Distancia en la Protección con Pararrayos

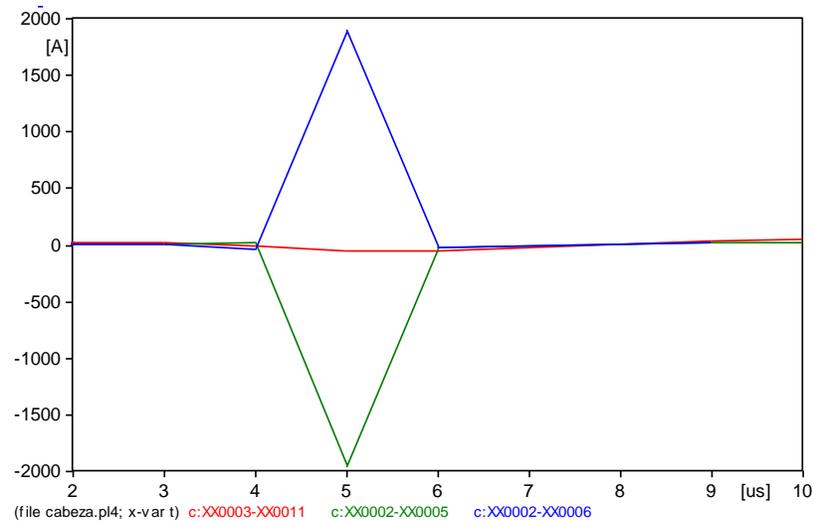
De acuerdo al estudio realizado, es necesario la protección de descargas atmosféricas en un campo abierto, para el cual lo que se quiere proteger se encuentra separado del pararrayos. Para ello se considera la distancia del anillo que ayuda a la protección de las vidas humanas, haciendo simetría de 25 metros equivale a $1\mu\text{H/m}$ y sabiendo que el área de una cancha profesional es de 10800 m^2 .

6.6.1. Protección Descarga Atmosférica - Cuerpo Humano (simulación del modelo)



Fuente: Elaboración propia.

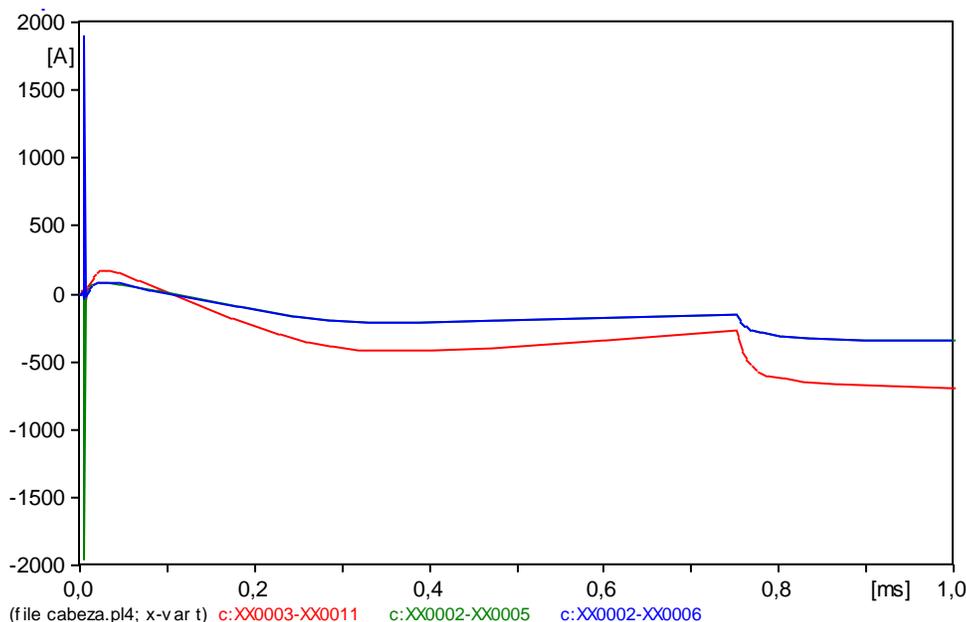
Figura 30. Cuerpo humano – Protección con anillo y pararrayos. Simulación en software ATPdraw



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 14. Comportamiento de cuerpo humano ante descarga atmosférica actuando protección anillo y pararrayos. Simulación en software ATPdraw.

Como se observa en la gráfica 14, el cuerpo humano aunque se use la protección del sistema de apantallamiento pierde por un lapso de tiempo de 4 μ s a 6 μ s la estabilidad en las piernas hasta lograr y controlar la cantidad de corriente que recorre estas extremidades debido a la masa muscular del individuo pero de manera rápida la persona está sana y se considera que puede presentar quemaduras pero sin lesiones internas.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 15. Acción de pararrayos y anillo en campo abierto. Simulación en software ATPdraw

En la gráfica 15, se puede observar que la amplitud de corriente ha sido reducida considerablemente, teniendo en cuenta que se está tomando a condiciones extremas y así mismo impidiendo que la descarga atmosférica dada por transferencia afecte la vida de las personas que estén expuestas en ese instante ya que el anillo conduce la corriente a tierra directamente a través de los electrodos dispuestos en el área o campo de protección.

Ahora bien, además de observar la amplitud de corriente en la gráfica 15, también se observa que de acuerdo a las características de fabricante, el tiempo de estabilización del pararrayos es excelente ya que este se activa de manera casi inmediata para así salvaguardar vida, equipos entre otras más, pero como objetivo fundamental, es proteger a toda aquella persona que se encuentre en uso de canchas de entrenamiento de fútbol en campos abiertos.

7. Resultados y Discusión

Durante el desarrollo investigativo para el diseño de un nuevo prototipo de apantallamiento en campos abiertos, se encuentra la manera de disminuir: tiempo de reacción del sistema, magnitud de corriente que maneja la descarga después de pasar por “el filtro” de apantallamiento para finalmente salvaguardar el objetivo principal, el ser humano.

Inicialmente se indicaba una corriente de 16 kA en un tiempo 8 μ s afectando directamente el cerebro de la persona dando como resultado una muerte instantánea, y otros tipos de corrientes como lo indica la gráfica 8, para el resto del cuerpo humano.

Para este caso el lugar de estudio indicaba que se tenía un subsuelo tipo arcilloso húmedo, obteniendo una resistividad de 126,468 Ω -m, para el cual fue necesario implementar el uso de materiales resistivos para mejorar las condiciones del terreno.

Seguido de esto y de acuerdo a la NTC 4552-3 la cual dice “Establece la metodología que debe ser utilizada para propender por la seguridad de las personas ubicadas en estructuras de uso común, expuestas a impactos directos o indirectos de rayos” se diseña un sistema de contrapeso o más conocido como terminal de tierra, hace que éste ayude a reducir la impedancia global de acuerdo a posibles descargar atmosférica por transferencia ya que el anillo logra ecualizar el potencial de la superficie del suelo y así mismo reduce la tensión de contacto a la que se expone una persona durante el tiempo de la descarga atmosférica dejando claro que pueda ocurrir una “falla de apantallamiento”.

De acuerdo a lo anterior, se busca la manera de mitigar la “falla de apantallamiento” con el uso de pararrayos (Mástil, de un asta tipo Franklin) debido a que éste disminuye considerablemente la corriente y busca una estabilidad logrando que el impacto lo logre soportar la persona.

Finalmente, la disposición de un sistema de apantallamiento en un campo abierto como el que se propone, hace que el tiempo de exposición sea demasiado corto en caso de que el sistema de protección no actué, es decir en un tiempo de 2 μ s. Como se logra observar en la gráfica 14, uno de los órganos vitales del cuerpo humano es protegido y solamente son expuestas las extremidades a una corriente aproximada de 2000 A ya que anteriormente se demostraba que el impacto era de 16 kA, dando como resultado final el cumplimiento de los objetivos propuestos y obteniendo la satisfacción de encontrar la manera cómo salvaguardar vidas humanas.

8. Conclusiones

- Se encontró que es posible un sistema de protección contra descargas eléctricas tanto directa como de transferencia en un campo de fútbol abierto siendo posible proteger vidas humanas y así lograr eliminar mitos que atenten contra la práctica del deporte en campos abiertos. Siendo importante no solo su implementación si no también su mantenimiento para que este siempre se encuentre en óptimas condiciones que se lograrían realizando una limpieza de la contaminación a la que se expone el sistema de apantallamiento.
- Se logró hacer un análisis e identificación de materiales de uso resistivo, y modelos existentes que hicieron que mejorara el sistema de apantallamiento frente a choques eléctricos causados por descargas atmosféricas, los cuales mediante las simulaciones hechas demuestran que las afectaciones a seres humanos expuestos en un campo abierto ya no tienen el mismo índice de probabilidad de fallecer por una descarga atmosférica en donde el sistema de apantallamiento dirige directamente la descarga a la puesta a tierra sin riesgo alguno.
- Se determinó el modelo a implementar a partir del análisis de los modelos existentes de apantallamiento de acuerdo a los requerimientos de los espacios abiertos en estudio, desarrollando un sistema de protección contra descargas atmosféricas efectivo y económico ya que no se necesita equipos tecnológicos avanzados o de gran valor monetario y todo gracias al estudio de leyes, fenómenos, entre otros, conocidos por el gran científico Franklin.
- Se comprobó que en la Sede de la Floresta de la Universidad de la Salle, cancha de fútbol, en su construcción no fue tenido en cuenta el nivel cerámico de este, ni de muchos lugares de nuestro país en el que no se tiene en cuenta para crear una cancha de entrenamiento, no se mira el nivel de gravedad, ya que no se rige bajo ninguna norma para el uso de dicha estructura, la cual según la norma NTC 4552-3 posee un nivel de gravedad severa tanto como por el área que ocupa, y por la estructura de cielo abierto. La evaluación de riesgos es un elemento importante en el proceso de diseño de un sistema de protección contra rayos, es por esto que se debe gestar una norma impuesta por el ente más importante en este deporte como la UEFA o la FIFA, para la implementación de dicha norma como método de evaluación efectivo y simple para la protección de la vida humana.
- Con la implementación de la esfera rodante se logró determinar la altura óptima para la disposición de los apantalladores, teniendo en cuenta la altura de penetración ya que no puede ser superior a la altura total que va desde el suelo hasta el sistema de captación, de lo contrario se anularía la esfera rodante y el área estaría expuesta a una descarga atmosférica.

9. Fe de erratas

Respecto a la sustentación tesis de grado dada el día 08 de Septiembre de 2016, de acuerdo a solicitud de los jurados de tesis: Ing. Pedro Pineda e Ing. Luis Correa, se habló de abordar la probabilidad de daño debido a los efectos del rayo, en donde el sistema propuesto tiene por misión provocar la excitación atmosférica por encima de cualquier otro punto del área a proteger, para así aumentar la probabilidad de que la descarga incida en su zona de influencia, y llevar a tierra la corriente del rayo; el sistema de captación propuesto presenta una fiabilidad de un 84% dado por el posicionamiento de los captadores de rayo según los niveles de protección contra rayos NPR dados en la NTC 4552 -1 visto a nivel de amplitud de corriente, lo cual reduce el porcentaje de rayos que podrían impactar el área protegida en un 16% ya que las perturbaciones son inevitables y es muy poco probable o imposible que se garantice una protección con el 100% de efectividad. La magnitud de los rayos que puede que sea de unos pocos kA hasta valores medios de 20 kA a 30 kA que puede ser el caso Colombiano. Únicamente el 5% de las descargas exceden 100 kA (TORRES SÁNCHEZ). Como el sistema no es 100% efectivo se incluirá algunas medidas para prevenir todo tipo de descargas atmosféricas y poder preservar la vida ante dicho evento.

No obstante, existe una serie de medidas preventivas de seguridad que se pueden adoptar para reducir significativamente el riesgo de sufrir una descarga eléctrica, ya sea en casa, en el trabajo o en el exterior (WikiHow, s.f.).

Por tal razón, a continuación se nombrarán algunas medidas para tener en cuenta:

1. **Revisa el informe del tiempo.** Tal vez parezca obvio, pero es importante que te asegures de contar con un pronóstico del tiempo cuando tengas una aventura al aire libre con la finalidad de no quedar atrapado en medio de una tormenta eléctrica. Incluso si solo sales por una tarde, el clima puede cambiar con rapidez y la mejor manera de prevenir es estar preparado. Infórmate sobre la probabilidad de que se produzca una tormenta eléctrica en la zona a la que piensas ir y planifica con anticipación antes de que comiencen los relámpagos.
2. **Presta atención a las señales que indican una tormenta.** Observa los cambios en la temperatura, el aumento del viento o el oscurecimiento del cielo. Escucha los truenos y, si parece que una tormenta se avecina, detén todas tus actividades y refúgiate en un lugar seguro de inmediato

3. **Busca un refugio.** Si te encuentras en exteriores y se avecina una tormenta, la única manera de protegerte de los rayos es dirigirte rápidamente a un refugio. Busca uno que esté completamente cerrado y que posea su propio sistema de electricidad y tuberías, como una casa o un negocio. Si no encuentras un lugar así, ocultarte en un auto con las puertas y ventanas cerradas también es una alternativa segura. Las zonas campestres cubiertas, los baños independientes, las tiendas de campaña y otras estructuras pequeñas no te mantendrán a salvo. ¿No puedes encontrar un refugio confiable cerca? Disminuye tu riesgo de sufrir una descarga eléctrica al seguir estas instrucciones preventivas:
 - Mantente agachado
 - Evita las áreas abiertas
 - Evita ponerte en contacto con el agua y los objetos de metal

4. **Espera.** Independientemente de que estés en interiores o exteriores, no abandones el área segura donde te encuentras durante al menos media hora después del último trueno que hayas escuchado. Si no sabes a ciencia cierta si la tormenta ha amainado, permanece en el interior.

10. Lista de Referencias

- CEI/IEC, 4.-1. (1994-09). *Effets of current on human beings and livestock*.
- CERTIFICACION, I. C. (2008). *Proteccion contra descargas electricas atmosfericas (rayo): Principios Generales. NTC 4552-3*. Bogotá D.C.
- CERTIFICACION, I. C. (2008). *Protección Contra Descargas Eléctricas Atmosféricas (rayos) NTC 4552-1*. Bogotá D.C.
- CERTIFICACION, I. C. (2008). *Protección Contra Descargas Eléctricas Atmosféricas (rayos): Principios Generales. NTC 4552*. Bogotá. D.C.
- Code, N. E. (1913). *NEC*.
- Corporation, L. B. (20 de MARZO de 2013). *MUNDO*. Obtenido de http://www.bbc.co.uk/mundo/temas/america_latina
- DISTRIBUCION, Á. D. (2006). *MEDIDA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO. NORMAS TÉCNICAS*.
- ELECTRIC, S. (s.f.). *PROTECCION EXTERNA*. Recuperado el 28 de JULIO de 2013, de <http://www.puestasatierra.com/content/category/4-proteccion-externa>
- ELECTROPOL. (2016). *PUNTA CAPTADORA*.
- EOSA, P. (24 de NOVIEMBRE de 2009). *Pararrayos y Sistemas de Tierra*. Recuperado el 19 de 9 de 2013
- Gabarda, L. P. (1994). *Corriente eléctrica: efectos al atravesar el organismo humano*. ESPAÑA : CENTRO NACIONAL DE NUEVAS TECNOLOGÍAS.
- GALLEGO, A. M. (2013). *ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGIAS PARA LA COORDINACION DE AISLAMIENTOS DE SUBESTACIONES A PARTIR DE SOBRETENSIONES DE TIPO ATMOSFÉRICO*. MEDELLIN: UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA.
- Ingesco. (2013). *Ingesco*. Recuperado el 15 de 9 de 2013, de <http://www.ingesco.com/es/empresa/iquienes-somos>
- INGESCO, C. ©. (2013). *INGESCO*. Recuperado el 21 de SEPTIEMBRE de 2013, de [INGESCO: http://www.ingesco.com/](http://www.ingesco.com/)
- Junior, P. (29 de ABRIL de 2014). *EL COMERCIO MUNDO*. Recuperado el 20 de NOVIEMBRE de 2014, de <http://elcomercio.pe/mundo/latinoamerica/cuales-son-paises-latinos-donde-hay-mas-muertes-rayos-noticia-1726058>
- LLC, T. (26 de 02 de 2014). *Factores que intervienen en el riesgo eléctrico*. Obtenido de <http://seguridad-iesgoya.wikispaces.com/Factores+que+intervienen+en+el+riesgo+el%C3%A9ctrico>

- Mexicana, A. 2. (2005). *NOM-001-SEDE*. Mexico.
- Pando, R. (2006). *Aspectos Básicos de las Descargas Atmosféricas* .
- Parámetros, D. f. (06 de 08 de 2016). *Descarga de retorno - TDX*. Obtenido de http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6281/capitulo_3;jsessionid=C996BFA C2E5382FA622DBAC6185DE28E?sequence=6
- PERU. (14 de OCTUBRE de 2013). *SISTEMA DE PUESTA A TIERRA*. Obtenido de PROCOBRE: <http://www.analfatecnicos.net/archivos/08.PuestaATierra.pdf>
- ROMÁN, Ó. D. (4 de agosto de 2008). Comportamiento de la impedancia de aterrizamiento de una víctima humana impactada por un rayo.
- T, P. S. (s.f.). *PLUS SUMINISTROS Y TECNOLOGIA SA DE CV*. Recuperado el 15 de MAYO de 2012, de http://plussuministros.com.mx/gem_cadweld.php
- Technologies, A. P. (Edición 5, 2005-10). *Descargadores de sobretensiones de alto voltaje*.
- TORRES SÁNCHEZ, H. (s.f.). *proteccion contra rayos. Segunda edicion* . Bogotá D.C.: ICONTEC , 2010.
- UNE 20-572-92 PARTE1, A. g. (1984). *Efecto de la corriente eléctrica al pasar por el cuerpo humano*.
- WikiHow. (s.f.). Obtenido de <http://es.wikihow.com/prevenir-descargas-el%C3%A9ctricas>