

Componentes del SPE protección contra rayos

RESUMEN

Este aporte se construye con el estudio teórico-experimental de comportamiento Termodinámico, Mecánico, Electroquímico y Eléctrico de los materiales y elementos componentes del SPE. Se consiguió especificar los componentes del SPE (Sistema de Protección Externo), además se dan recomendaciones de diseño, instalación y mantenimiento. Se constituyó como un aporte académico a la NTC 4552 [10.].

PALABRAS CLAVES

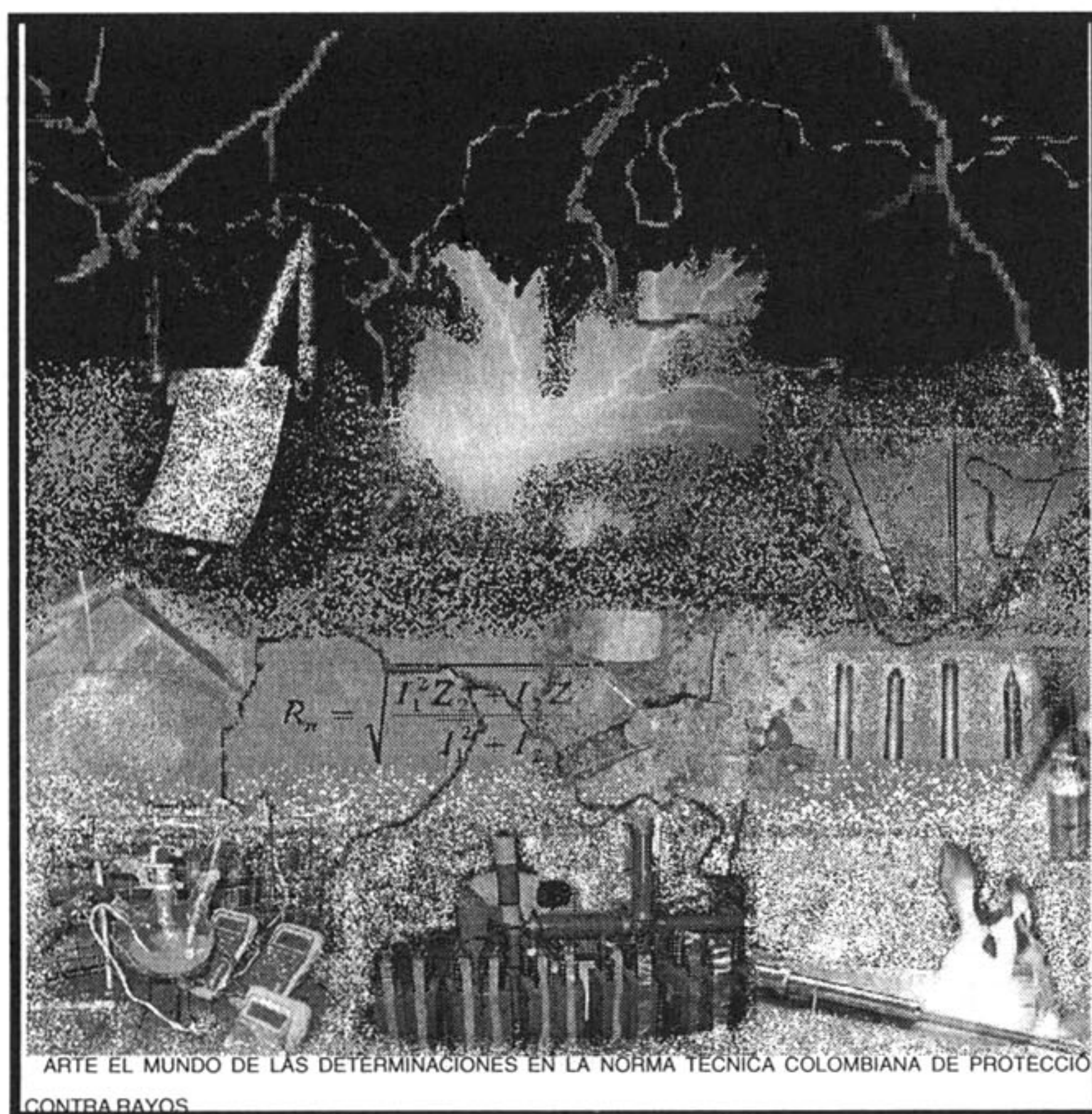
Bajantes, Corrosión, Diseño, Instalación y Mantenimiento del SPE, Electrodo de Puesta a Tierra, Terminales de Captación.

ABSTRACT

This paper presents an academic support for the Colombian Lightning Protection System Standard. The study concludes with the minimum with dimensions of air terminals, downconductors and earthing electrodes. Also some clues for designing, installation, as well as maintenance tips are described.

KEYWORDS

Lightning Protection, earthing electrodes, Compatibility, Corrosion, Entropy.



□ **Juan Carlos Forero Caro, Ing.**
Investigador, IE, Universidad
Nacional de Colombia, Bogotá.

□ **José Luis Viaña Lambis, Ing.**
Investigador, Universidad Na-
cional de Colombia.

*GIPT, Grupo de Investigación en Protecciones
y Sistemas de Puesta a Tierra. Universidad
Nacional de Colombia, Ciudad
Universitaria, Edificio 453-222, Bogotá.*

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace mucho tiempo en Colombia se ha planteando la idea de adaptar los principios de las normas técnicas acreditadas y reconocidas a las características propias de Colombia, origen de las Normas Técnicas Colombianas.

La NTC 4552 objetivamente vigila que, por causa de DEAT, se eviten los riesgos en la seguridad, la salud humana, animal o vegetal así como la integridad de las estructuras de uso común y equipos.

En este artículo se presenta de forma resumida el estudio teórico experimental. (Comportamiento Mecánico, Eléctrico, Electroquímico y Termodinámico de los materiales y elementos componentes del SPE) realizado para formar las bases académicas que soportarán lo que la Norma determina.

El Sistema Integral de Protección contra Rayos capta, redirecciona, distribuye, evacúa la corriente de rayo y protege a las personas, estructuras y a los equipos de los efectos directos e indirectos de un rayo¹. Se denomina “Sistema de Protección Externo Contra Rayos” (SPE) a la totalidad de los dispositivos e instalaciones en el exterior, encima y/o adosados a la estructura que se ha de proteger, para captar y derivar la corriente de rayo a la instalación de puesta a tierra de forma segura.

El desempeño mecánico de los materiales, a pesar de ser uno de los aspectos más importantes a tener presente al momento del diseño e instalación del SPE, es al igual que los efectos corrosivos, pasos muchas veces ignorados por parte de los ingenieros encargados del diseño, instalación y mantenimiento de dichos sistemas.

El problema de la degradación de infraestructuras embebidas en concreto debido a los procesos de corrosión, es particularmente serio por las implicaciones económicas cuantiosas. Por tal razón, la habilidad para evaluar la severidad de la corrosión en estructuras existentes y para predecir su vida de servicio es cada vez más importante.

2. PARÁMETROS DEL RAYO

Los parámetros utilizados para describir el impulso de los rayos (o los impulsos en el caso de impactos de descarga múltiple) son numerosos. Se pueden citar en particular: amplitud de la corriente, tiempo de frente (ascenso), tiempo de cola, rata de ascenso de la

corriente del rayo [kA/ms], carga eléctrica y energía específica.

Cada descarga puede presentar al menos un impulso con un tiempo de ascenso entre 0.1 y 10 ms, una duración total entre 50 y 100 ms y una corriente pico de hasta 500kA [1.]. El rayo más destructivo puede contener 40 de estas descargas con una duración total que se aproxima a un segundo [2.].

3. EFECTOS DEL RAYO

Los diferentes parámetros descritos anteriormente no conducen a los mismos efectos ni a las mismas formas de falla de los diferentes materiales.

La amplitud de corriente, se utiliza generalmente para tratar los problemas de sobretensiones y los problemas de choques mecánicos generados por los impactos del rayo. El tiempo de subida se utiliza tan sólo para tratar el problema de las sobretensiones. El tiempo de cola está ligado a los efectos mecánicos y térmicos, en este sentido sirve para determinar la aplicación de las fuerzas y esfuerzos mecánicos y térmicos. Este tiempo de cola es principalmente representativo de la energía de un rayo conjuntamente con la amplitud. Para representar esta energía, el binomio amplitud/ tiempo de cola se puede reemplazar por:

- Energía específica $\int i(t)^2 \cdot dt$ [A²·s]; útil para el dimensionamiento de los componentes; Terminales de Captación, conectores y conductores (bajantes).
- Carga eléctrica $\int i(t) \cdot dt$ [A·s]; útil para caracterizar los protectores de sobretensiones ligados a los sistemas de protección o la fusión de un metal en el punto de impacto del rayo.

Los malos contactos son puntos particularmente peligrosos en la trayectoria de la corriente del rayo. Las resistencias de contacto de alguna milésimas de ohmio provocan un desprendimiento de calor suficientemente grande como para que se puedan derretir cantidades de metal apreciables y saltar como chispas. Si un material fácilmente inflamable se encuentra próximo a uno de estos puntos de contacto defectuosos, se puede iniciar fuego indirectamente.

En conductores, si la sección es suficiente, no aparecen más consecuencias visibles que un calentamiento, aún con el efecto pelicular. Los calentamientos que llegan hasta la temperatura de fusión sólo se producen

1 Nuestro contexto: “Colombia, uno de los países más tormentosos del mundo”- <http://paas.unal.edu.co/>

en conductores de sección muy pequeña o de resistividad muy alta. Con la energía de un impulso de 1kA (8/20), a través de un (1) metro de conductor No. 26 AWG de Cobre, se sobrepasa la temperatura de evaporación de este material. En los malos conductores mucha de esta energía se libera en forma de calor por el paso de la corriente. Por ejemplo, el agua contenida en la madera y en el concreto, se calienta y se vaporiza. Por la brevedad del fenómeno en su conjunto, y como consecuencia del aumento de presión, se puede producir la explosión de árboles o de postes.

Este tipo de fenómenos explosivos tiene lugar con preferencia en entornos donde la humedad se acumula en puntos de entrada o de salida de corriente entre un material mal conductor (ladrillo) y un material buen conductor (abrazaderas de fijación de una bajante dañada).

Por la interacción recíproca entre la corriente del rayo dentro de un conductor y el campo magnético terrestre, se pueden producir unos efectos mecánicos (fuerzas) del orden de 10 N por metro de conductor, por lo tanto dichos efectos son insignificantes. Los esfuerzos mecánicos más potentes sobre la instalación del SPE son las fuerzas de atracción entre caminos paralelos de la corriente de rayo cuando la separación es lo suficientemente corta. Esta es la causa de que las antenas tubulares delgadas se aplasten y los conductores paralelos se entrechoquen.

La gran cantidad de *chispas* que aparecen después del impacto violento de un rayo, a veces incluso dentro de los edificios con una instalación de SPE, se puede explicar por dos efectos bien conocidos¹:

- El aumento de potencial en las tomas de tierra, que depende principalmente de la intensidad del pico de corriente, i (amplitud) y la impedancia del SPE. Los fenómenos de inducción sobre las instalaciones eléctricas y de datos, que dependen principalmente de la pendiente di/dt (pendiente de subida) de esta corriente.

4. SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERNO

En el diseño del SPE se deben considerar los efectos eléctricos y mecánicos de una descarga, así como también la compatibilidad electroquímica y electromagnética con el medio.

En general éste se ha tratado como un arreglo electro-geométrico de elementos encargados de recibir (Terminales de Captación), transportar (bajantes) y evacuar (electrodos de puesta a tierra) la energía liberada por un rayo. Existen diversas metodologías

empleadas conjuntamente para el diseño de los arreglos electro-geométricos del SPE, los más conocidos son; Método Franklin, método jaula de Faraday o malla, método de esfera rodante -*Rolling Sphere*-, *Collection Volume*[4.], *Leader Progression Model*[5.], y *least-time/maximum-probability theory of lightning propagation* [6.].

5. MATERIALES PARA EL SPE

El criterio empleado para la selección de los materiales de los componentes del SPE es:

- Alta resistencia a la fusión y deterioro de las uniones bajo las condiciones que implica la energía del Rayo tanto en magnitud como en duración, a la que pueden estar sometidos.
- Alto grado de robustez mecánica, especialmente de aquellos componentes que se van a encontrar en localidades expuestas a daño físico.
- Alta conductividad eléctrica, de tal forma que no contribuya sustancialmente a daños locales por altas diferencias de potencial eléctrico.
- Buena resistencia a la corrosión (Resistencia al desgaste).

El grupo de materiales conductores que satisfacen estos requerimientos, lo forman los metales puros y sus aleaciones. En su desempeño tiene influencia el tratamiento mecánico del metal. Por ejemplo, como resultado del recocido se eleva la conductividad eléctrica y se disminuye su rigidez mecánica. El Cobre es el material conductor más usado a causa de su alta conductividad eléctrica, plasticidad y resistencia a la corrosión, además, actualmente su relación beneficio-costos es la más favorable. En el aire, los conductores de Cobre se oxidan lentamente recubriéndose con una fina capa de óxido de Cobre (CuO). La capa de óxido formada previene al Cobre de ulteriores oxidaciones. La corrosión del Cobre es provocada por: Anhídrido Sulfuroso (SO₂), vapores de Ácido Nítrico (HNO₃), Hidrógeno Sulfurado (H₂S), Amoníaco (NH₃), Óxido Nítrico (NO) entre otros [7.].

El carácter peculiar del Bronce es su elevada dureza (en comparación con el Cobre), gran resistencia al desgaste, elasticidad y anticorrosividad.

El Aluminio es 3,3 veces más ligero que el Cobre, su

2 Se estima que la estructura debe estar en capacidad de soportar tensiones de alrededor de 5 kV y corrientes de 9 kA [3.]. Resultados revelados por Whitehead en *Mechanism of Lightning Flashover*



resistencia específica es 1,68 veces mayor que la del Cobre, así que, si comparamos los pesos de los conductores de Aluminio y de Cobre para una misma longitud y una misma resistencia eléctrica, el conductor de Aluminio tendrá menos peso -casi la mitad- en comparación con el conductor de Cobre.

Las deficiencias del Aluminio son su baja resistencia a la tracción y su blandura. En el aire, el Aluminio se recubre rápidamente de una fina capa de óxido (Al2O3) que lo protege de posteriores corrosiones. Esta capa de óxido posee considerable resistencia eléctrica, por tanto, en los puntos de unión de los conductores de Aluminio puede formarse una alta resistencia de contacto. Al humedecerse los puntos de contacto del Aluminio con conductores de otros metales (Cobre, Hierro) puede formarse un par galvánico bastante alto (del orden de 1.0V). Entre los agentes que actúan directamente sobre el Aluminio deben mencionarse el Cloro, los vapores de Nitro, de Azufre, Salinas y Ácido Acético [7.].

El Hierro y algunos Aceros son actualmente los materiales conductores más baratos y que poseen la más alta resistencia a la tracción pero su aplicación está limitada porque el Hierro tiene muy baja estabilidad a la corrosión, se oxida fácilmente en el aire y posee una elevada resistencia eléctrica específica en comparación con el Cobre y el Aluminio. Adicionalmente hay un aumento de la resistencia eléctrica en corriente alterna, ésta es particularmente grande ya que el Hierro y el Acero son materiales ferromagnéticos¹.

6. COMPONENTES DEL SPE

Las ecuaciones utilizadas para dimensionar los componentes del SPE son esencialmente ecuaciones de equilibrio energético², con criterio de protección; factor de seguridad dos aplicado a la temperatura de revenido.

- 1 Para reducir la inductancia y la resistencia eléctrica a las corrientes alternas se utilizan Aceros de baja permeabilidad magnética. Acero granulado y estirado en frío (Templado).
- 2 Con esto se pretende evaluar el mínimo incremento de entropía específica.

$$C_o(1+\beta\theta)\delta_m \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = \rho_o(1+\alpha_o\theta_o)J^2 \tag{1}.$$

Donde, Co: Calor Específico del material [cal/g.°C], â: coeficiente de variación del calor específico en relación con la temperatura [1/°C], dm: Densidad volumétrica del material [g/cm³], ro: Resistividad eléctrica del material [W-mm²/km], ao: Coeficiente de Variación Lineal de la Resistencia [1/ °C], qo: Temperatura en el Tiempo t=0 y J: Densidad de corriente [A/cm²].

Como complemento al análisis anterior se realizaron ensayos mecánicos de elongación y de estricción (cambio de área) debido al alargamiento, cuyos resultados dependen del paso de trenzado de los hilos en el conductor, si éste es cable. Es precisamente el valor del paso el que determina que un conductor sólido tenga menos peso que un cable, pues se utiliza mayor cantidad de Cobre para lograr una misma sección transversal. A pesar de que el incremento de la masa no excede el 5% al de un conductor sólido, el trenzado aumenta en más de un 20% la resistencia a la tracción.

El análisis de comportamiento electroquímico de diferentes muestras de material, en electrolitos naturales y artificiales, se sintetiza en las tablas 1,2,3 y 4.

Muestra de Cobre	Peso Inicial [g]	Peso Final [g]	Pérdida [g/h]
Sólido	53,0402	53,0399	3,0
Electrodepositado	40,7766	40,7760	6,0
Enchquetado	49,5913	49,5904	9,0
Cadwell	8,0008	8,0001	7,0

Tabla 1: Resultados ensayo corrosión acelerada (1000h) en cámara salina.

Metal	Atmósfera Industrial [m/año]	Atmósfera Rural [m/año]	Atmósfera Marina [m/año]
Cobre Electrolítico	1,40	0,13	0,56
Bronce, 8% Estaño	2,23	0,13	0,71
Aluminio	1,62	0,05	0,10

Tabla 2: Velocidad de ataque corrosivo en diferentes atmósferas para el Cobre, Aluminio y Bronce [8.].

- 3 Para reducir la inductancia y la resistencia eléctrica a las corrientes alternas se utilizan Aceros de baja permeabilidad magnética. Acero granulado y estirado en frío (Templado).
- 4 Con ésto se pretende evaluar el mínimo incremento de entropía específica.

Electrodo Cobre	Suelo ó Material PT ⁵	Velocidad de Ataque [•m/año]
Sólido	Natural	3,85
Sólido	MAPT1	0,18
Sólido	MAPT2	1,22
Electrodepositado	Natural	4,12
Electrodepositado	MAPT1	0,42
Electrodepositado	MAPT2	1,01
Enchaquetado	Natural	4,31
Enchaquetado	MAPT1	0,53
Enchaquetado	MAPT2	1,24

Tabla 3: Resultados. Estimación velocidades de ataque en electrodos de puesta a tierra de Cobre.

Las de velocidades de ataque (corrosividad del medio) en los electrodos de puesta a tierra en suelos naturales y MAPT, se estimaron a partir de las curvas de polarización electroquímicas para 18 muestras. Nótese que la exigencia de alta precisión y calidad de las medidas y procedimientos de las pruebas son requerimientos que permiten comparar la agresividad del electrolito contra las muestras de electrodos de puesta a tierra.

Periodo en Concreto	Aleación de Aluminio	Velocidad de Ataque Promedio [•m/año]	Velocidad Máxima de Ataque [•m/año]
6 meses	3003	5,1 a 45,7	15,2 a 109,2
8 años	2017-6053	48,3	96,5
27 años	6051	35,6	66,0

Tabla 4: Velocidad de ataque corrosivo del Aluminio en concreto. Estimados a largo plazo estocásticamente [9.].

7. DIMENSIONAMIENTO DE COMPONENTES

La especificación describe el desempeño técnico y los requerimientos físicos de cada uno de los componentes. Lo primero ya se ha presentado y lo segundo se resume¹ en las tablas 5, 6 y 7.

Aunque los requerimientos funcionales de los componentes del SPE varían un poco dependiendo de cada aplicación, la gran variedad de productos disponibles que utilizan diferentes tecnologías proveen

esencialmente el mismo grado de protección².

1 La base de cálculos tiene como parámetros físicos las características físicas del Cu electrolítico 99.9%, Al5 y el Acero inoxidable 304. Éstos no cambian sustancialmente de una aleación a otra de la misma base.

2 El estado del arte actual dice que ninguna tecnología reciente de Terminales de Captación es más o menos efectiva que los tipo Franklin.

Terminales de Captación			
Material	L _{min} [cm]	D _{min} [mm]	A _{min} [mm²]
Cu	18,6	9,6	72,9
Al	17,3	12,4	121
Bronce	49	6,8	36,6
Acero	28,7	4,6	16,4
Cu (Tubular)	18,6	11,5 (1,95")	32,4

Tabla 5: Dimensiones mínimas para los terminales de captación.

Bajantes	
Metal	Dimensiones
Cu-Sólido	D _{min} : 12,9mm
Al-Sólido	D _{min} : 16,54mm
Cu-Cable	A _{min} : 18,78mm² (4 AWG)
Al-Cable	A _{min} : 30,8mm² (2 AWG)

Tabla 6: Dimensiones mínimas para las bajantes

Electrodos de Puesta a Tierra		
Material	L _{min} [m]	D _{min} [mm]
Cu-Sólido	2,4	12,9
Cu-Electrodepositado ⁶		13,8
Acero Inoxidable		16,7

Tabla 7: Dimensiones mínimas para los electrodos de puesta a tierra

6 La base de cálculos tiene como parámetros físicos las características físicas del Cu electrolítico 99.9%, Al5 y el Acero inoxidable 304. Éstos no cambian sustancialmente de una aleación a otra de la misma base.

7 El estado del arte actual dice que ninguna tecnología reciente de Terminales de Captación es más o menos efectiva que los tipo Franklin.

8 Espesor de la pared.

5 Electrolito; MAPT1(2) indican dos clases de materiales artificiales de puesta a tierra diferentes. MAPT1: pH=7,8 y G=5mS; MAPT2: pH=6,7 y G=+20mS; Suelo Natural: pH=7,5 y G=0,15mS.

Donde, *L* es longitud, *D* Diámetro y *A* sección transversal de un conductor cilíndrico macizo (alambre) o en hilos (cable), respectivamente.

8. RECOMENDACIONES

Algunas recomendaciones adicionales de instalación y mantenimiento, se relacionan a continuación:

- No hacer bucles, ni dobleces al conductor bajante con un ángulo menor que 90°.
- Las uniones en los terminales o derivaciones se deben hacer preferiblemente con soldadura exotérmica
- Utilizar conectores que protejan la unión contra la humedad del ambiente (mediante enlacado, uso de compuestos u otros medios).
- Gracias a la mayor estabilidad termodinámica del Cobre frente al Aluminio, se recomienda utilizar preferiblemente conductores de Cobre como bajantes.
- En el caso de bajantes desnudas embebidas en el concreto, no se recomienda utilizar Aluminio ya que éste puede atentar contra la integridad del concreto.
- Se puede embeber el Cobre y el Acero de armado dentro del concreto. Éstos son electroquímicamente compatibles.
- Se considera necesario realizar una inspección visual para asegurar que ninguna extensión o modificación sobre la estructura protegida domine sobre la instalación del SPE, la continuidad eléctrica de los conductores sea buena, la fijación de los diferentes componentes y protecciones mecánicas estén en buen estado, ningún elemento del SPE se encuentra afectado por la corrosión, las distancias de seguridad sean respetadas y las uniones equipotenciales estén en buen estado.
- Por evidencia práctica se sabe que aislando las superficies metálicas susceptibles a la corrosión, reenrutando si es posible los metales enterrados y aplicando aislantes en las partes más próximas o no usando preferiblemente metales en la infraestructura enterrada, se puede evitar la corrosión. Sin embargo, en algunos casos esto no es suficiente o no es posible, así que debemos aplicar principios básicos de la electroquímica para defendernos contra la corrosión.

9. CONCLUSIONES

Se presentan recomendaciones de ingeniería y criterios prácticos para la selección de componentes, diseño, instalación y mantenimiento del SPE. Intencionalmente se administra una conciencia de prácticas recomendadas en un área donde la falta de información o su desconocimiento han dominado. No obstante, con estas recomendaciones no se intenta reemplazar o tomar prioridad sobre la norma NTC 4552.

En cuanto a los materiales, la norma Colombiana [10.], entre algunas otras, no consideran más que al Cobre y al Aluminio como materia prima de los componentes del SPE. Son igualmente aplicables otras aleaciones como Bronce y Acero Inoxidable. Comparando los resultados de este estudio con las dimensiones dadas en las normas acreditadas más conocidas, se observa que, los aquí presentados se encuentran dentro del amplio margen, que entre dichas normas se dimensionan los componentes del SPE.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1.]HART W., MALONE C. y EDGAR W. Lightning and Lightning Protection. don white consultants Virginia. USA. 1983.

[2.]McCANN G. The Measurement of Lightning Currents in Direct Strokes. AIEE Transactions. Vol. 63. 1944. pp. 1157-64

[3.]HASSE P. Protección Contra Sobretensiones de Baja Tensión. Editorial paraninfo. México.

[4.]Global Lightning Technologies Pty. Ltd. Guide for Design of Lightning Protection Systems & Surge/ Transient Protection. Australia. 1996.

[5.]TORRES H. El Rayo. Instituto Colombiano de Normas Técnicas. Bogotá. Colombia. 1994.

[6.]BRIËT R. Verification of the least-time/maximum-probability theory of lightning propagation and theory of lightning protection. Lightning & Transients. www.rblTEM.com

[7.]DROZDOV N. Estudio de Materiales Eléctricos. Editorial pueblo y educación. Ciudad de la Habana Cuba. 1990.

[8.]American Society for Metals. Metals Handbook. Properties and Selection of Metals. vol. 1. 8th edition. Ohio. 1961.

[9.]CÉSPEDES V. Corrosión en Acero de Refuerzo en Estructuras de Concreto. Proyecto de Grado. Universidad Nacional de Colombia. Ingeniería Química. Bogotá. 1981.

[10.]NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. NTC 4552. Protección contra Descargas Eléctricas Atmosféricas, 1999-07-28. Bogotá. Colombia.

9 Espesor mínimo del recubrimiento: 1,2mm.

AUTORES



Juan Carlos Forero Caro. Ingeniero Electricista de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2000. Estudiante de Maestría en Ingeniería Eléctrica (Alta Tensión), Investigador de GIPT, Universidad Nacional de Colombia, Ciudad Universitaria, Edificio 453-222, teléfono 3165015, Bogotá, Colombia, jcforero@ieee.org



José Luis Viaña Lambis. Ingeniero Electricista de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2000. Investigador del Grupo de Investigación en Protecciones y Sistemas de Puesta a Tierra (GIPT), Universidad Nacional de Colombia, Ciudad Universitaria, Edificio 453-

222, teléfono 3165015, Bogotá, Colombia, joseluisviana@ieee.org

La acción más pequeña vale más que la intensidad más grande

(L. Elsemborg)
