

ESTUDIO DE LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS BAJO LA INFLUENCIA DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS Y LA SELECCIÓN, FORMA Y REQUERIMIENTOS DE LA APLICACIÓN DEL PARARRAYOS PARA LA APLICACIÓN DE INSTALACIONES

Rusbel A. González González**

Henry A. Minchala Valencia**

Juan Gallo Galarza*

Ingeniería Electrónica Industrial Especialidad Automatización, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación (FIEC), Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)

Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)

Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 vía Perimetral. Apartado 09-01-5863. Guayaquil Ecuador

ragonzal@fiec.espol.edu.ec

hminchal@fiec.espol.edu.ec

Resumen

El fenómeno de las descargas atmosféricas ha sido a la largo de los años una molestia de grandes magnitudes respecto a las consecuencias que se encuentran asociadas al impacto de las mismas, ya sea para las instalaciones eléctricas en casi todas las industrias como para las personas que laboran allí.

El objetivo del presente estudio tiene como finalidad conocer más a profundo sobre los parámetros y peligros que se pueden presentar debido a impactos directos o cercanos a las instalaciones o estructuras que se pretenden proteger. Para lo cual se identificarán, analizarán y evaluarán distintos riesgos considerados los de prioridad o mayor magnitud de destrucción en caso de existir algún impacto, los riesgos serán evaluados en una industria local como lo es Industria Cartonera Ecuatoriana (ICESA), dedicada a la producción de cajas de cartón.

Además se realizará la protección externa e interna para protección de diversas edificaciones dentro de la ICESA, contra descargas atmosféricas bajo la metodología IEC 61662 de 1995, en donde, se aplicará el método de la esfera rodante y se utilizarán pararrayos, los mismos que serán instalados de acuerdo exigencias que citan las diferentes tablas dentro de las normativas IEC.

Cabe indicar que para las tres edificaciones evaluadas, el nivel de protección aplicado fue el mayor, para un mejor entendimiento del mismo y definición del sistema en sí. Y como nota especial se debe citar la importancia que significa proveer a toda instalación de un buen diseño de puesta a tierra, puesto que el mismo, no solamente sirve de protección como parte del SPDA contra sobretensiones producidas por descargas atmosféricas, sino que a la vez sirve de protección para toda sobretensión de cualquier tipo que se ponga de manifiesto, protegiendo nuestra instalación y la integridad del personal que labora, siendo este el principal propósito.

Palabras claves: Descargas atmosféricas, Sobretensiones, SPDA (Sistema de Protección contra Descargas Atmosféricas).

Abstract

The electric atmospheric discharges have been a big nuisance through years in respect to the consequences related to their strike for both the electric installations as well as the employees working there.

The object of the actual study has the purpose to get a deeper knowledge of the lightning parameters and the related dangers due to their direct or close strike to installations and structures we intend to protect. We will identify, analyze and evaluate distinct risks considered as priorities or of greater destruction magnitude in case of a strike, the risks will be evaluated in a local industry, in this case Industria Cartonera Ecuatoriana (ICESA), which produces cart-board boxes.

Also, external and internal protection will take place to secure different buildings in ICESA, against lightning strikes under the IEC 61662 methodology, 1995, in which the rolling sphere method will be applied and will use lightning rods which will be installed according to the requirements included in the tables in the IEC norms.

For the three buildings evaluated, the greatest level of protection was applied, for a better understanding of it and the definition of the system itself. As a footnote I will mention the importance of providing a good conductive path from the lightning rod to the ground, since itself not only works as a protection from the SPDA against high tensions produced by atmospheric discharges, but also as a protection for every high tension of any kind that can be produced, hence protecting our installation and the integrity of the personnel, being this the main intention.

Keywords: atmospheric discharges, high tension, SPDA (Atmospheric Discharges Protection System for its Spanish acronym).

1. ASPECTOS PRELIMINARES DEL PROYECTO

Las descargas atmosféricas se presentan a lo largo del planeta, la frecuencia en las que se pone de manifiesto depende de la zona geográfica en donde nos encontremos, llegando a contabilizar hasta 8.000.000 de descargas atmosféricas en un día en todo el planeta. La magnitud de sus parámetros es sorprendente, intensidades del rango de 30 hasta 300 kiloamperios en sólo millonésimas de segundo, abarcando grandes longitudes y alcanzando valores de hasta 20 billones de vatios de potencial con temperaturas de 30.000°C.

Descripción y enfoque del estudio

El estudio básicamente se basa en la protección de las edificaciones dentro de ICESA, el reconocimiento de sus partes, de sus instalaciones y demás características, indispensables al momento de evaluar y encontrar el nivel de protección requerido por cada una de estas.

Para esto se utilizan listas de chequeo en secciones más susceptibles a sufrir daños en caso de presentarse una descarga atmosférica, así mismo serán evaluadas las edificaciones de Administración, Calderas y Planta de Manufactura, con el fin de encontrar un diseño apropiado del SPDA.

Todo esto será instalado y diseñado de acuerdo a especificaciones que dicta la normativa IEC (61662 de 1995, 61024-1, 62304, etc.).

Objetivos

Como objetivo principal se tiene estudiar las instalaciones eléctricas bajo la influencia de las descargas atmosféricas para minimizar o evitar en lo posible los riesgos que se presentan en la instalación a proteger debido a impactos de las descargas atmosféricas, previniendo así todo tipo de riesgos en personas, accidentes de incendio por tensiones de paso o diferencia de potencial durante el impacto.

Se pretende analizar los diferentes tipos de riesgos que involucra a una descarga atmosférica, a fin de definir y establecer diseños para la protección de las edificaciones de ICESA, analizar las diferentes normativas y aplicar el pararrayos como parte de nuestro SPDA.

2. TEORÍA SOBRE LA GENERACIÓN DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

2.1. Estudio De la Descarga Atmosférica

Las descargas atmosféricas, son los principales causantes de riesgos electromagnéticos, las magnitudes asociadas a este fenómeno, como se citó

anteriormente, son enormes, especialmente en países con alta incidencia de descargas atmosféricas.

Son causadas por la generación de cargas electrostáticas, generadas durante la tormenta eléctrica y asociada a un tipo particular de nube llamada cumulus-nimbus.

Las tormentas generan peligrosas cargas eléctricas por kilómetro cuadrado dentro de estas nubes. La diferencia de potencial entre la base de la nube y tierra aumenta ionizando el aire, siendo la resistencia eléctrica del aire antes de la ruptura de 3KV/mm.

Pueden ser del tipo positivas y negativas, siendo las primeras de mayor magnitud, aunque las que nos interesan son las negativas, las cuales se dan de nube a tierra y provocan serios problemas.



Figura 1. Descarga Negativa Nube - Tierra

2.2. Efectos directos e indirectos sobre los seres humanos

2.2.1. Efectos directos. Los efectos directos sobre personas son fulminantes debido a las magnitudes de sus parámetros. Mayormente la muerte aparece por los efectos térmicos y eléctricos instantáneos.

2.2.2. Efectos indirectos. Los efectos son fuertes tensiones de paso en la superficie de la tierra, y debido a que el cuerpo humano es sensible a toda actividad electromagnética, este se ve afectado.

Durante el impacto se producen efectos físicos, térmicos, acústicos, electroquímicos y pulsos electromagnéticos que varían de acuerdo a la intensidad de la descarga y se propaga radialmente hasta 1500 metros desde el punto de impacto. Entre los efectos físicos provocados en personas tenemos:

- Paro cardiaco
- Paro respiratorio
- Lesiones cerebrales
- Quemaduras en la piel
- Fibrilación ventricular, etc.

2.3. Efectos directos e indirectos sobre instalaciones

2.3.1. Efectos directos. El impacto directo de una descarga sobre las instalaciones, tiene como consecuencia la destrucción total de los equipos

debido a su gran potencial y excesiva corriente, y posibles incendios, especialmente si en la estructura se encuentran materiales combustibles.

2.3.2. Efectos indirectos. Los efectos indirectos por impactos cercanos a la instalación también repercuten en el averío de elementos electrónicos hasta puede provocar algún incendio. Entre los efectos indirectos que puedes provocar las descargas atmosféricas tenemos:

- Pulsos electrostáticos
- Sobrevoltajes transitorios

2.4. Parámetros de la Descarga Atmosférica

Las descargas atmosféricas son un fenómeno natural de gran espectacularidad y enorme potencial eléctrico, por lo que sus parámetros resultan ser así mismo de grandes magnitudes, entre los de mayor importancia tenemos:

- Nivel cerámico. Número de días de la actividad de rayos por año y km².
- Densidad de rayos a tierra. Número de rayos a tierra por km² al año.
- Polaridad de la descarga atmosférica. Signo de las cargas transferidas. Generalmente es 80% de nube a tierra (descargas negativos) y el 10% descargas tierra a nube (descargas positivas).
- Amplitud de la corriente. Variable y de gran importancia al diseñar nuestro SPDA.
- Forma de onda de la descarga atmosférica. Se la puede representar por la tasa de crecimiento de la misma del orden de los KAmper/seg.
- Ángulo de incidencia. De la descarga atmosférica con cualquier punto terminal respecto a la línea vertical.

3. Identificación de Riesgos para la Edificación a Proteger

3.1. Descripción de la Industria Cartonera Ecuatoriana (ICESA)

Industria dedicada a la fabricación de cartón, cuenta entre sus líneas con 2 corrugadoras y 6 imprentas, éstas cuentan con una cantidad considerable de motores y dispositivos eléctricos y electrónicos para el funcionamiento de las mismas.

ICESA cuenta con una subestación principal, donde se reduce la tensión suministrada por la CATEG de 69 a 13.8 KV, posteriormente esta tensión llega hasta tres subestaciones secundarias, para las diferentes secciones dentro de las instalaciones de la empresa. Tenemos:

Subestación de Corrugadoras e Imprentas, que cuenta con dos transformadores (trifásico de 1000 KVA y Banco de tres transformadores monofásicos

3x250 KVA) que reducen la tensión de 13.8 KV a 460 VAC.

Subestación de Caderas, cuenta con un banco de 3 transformadores monofásicos 3x167 KVA y suministra energía al área de calderas y aditamentos, reduce la tensión de 13.8 KV a 460 VAC.

Subestación de la Sección administrativa que cuenta con un banco de tres transformadores monofásicos, 3x50 KVA, suministra energía al edificio administrativo y varias estructuras más y reduce la tensión de 13.8 KV a 220 VAC.

3.2. Identificación de Riesgos, utilización de Listas de Chequeo

Para minimizar los riesgos debido al impacto de una descarga atmosférica, se realiza la identificación de riesgos con ayuda de métodos para el efecto. Las listas de chequeo son listas de fácil comprensión y son una base de partida para ser complementadas con otros métodos y lograr una mejor interpretación, las mismas serán aplicadas para secciones que se consideren de prioridad, éstas son:

1. Subestaciones secundarias
2. Tableros principales de distribución
3. Canaletas eléctricas

3.2.1. Subestaciones Secundarias. El formato del listado de chequeo es el siguiente:

Lista de Chequeo					
Industria Cartonera Ecuatoriana					
Subestaciones Secundarias					
Fecha:					
Área:					
Responsable:					
Item	Descripción	Sí	No	N/A	Obs.
1	La estructura posee Sistema De protección contra Descargas atmosféricas?				
2	Los Transf. poseen SPAT para contrarrestar sobretens. de origen atmosférico?				
3	Existe sistema de drenaje o área De confinamiento en caso de producirse un derrame d aceite?				
4	Se encuentra cerca de materiales O sustancias Inflamables?				
5	Existe espacio suficiente para realizar algún trabajo en caso De requerirlo?				
6	Las paredes son reforzadas y Resistentes al fuego?				
7	Existe alguna protección Adicional para la Protección contra sobretensiones?				
8	Las conexiones en los bancos se encuentran en buenas condiciones?				
9	Poseen seccionadores o velas Para desconexión de los bancos?				

Los cuartos de transformadores no poseen SPDA y el diseño de puesta a tierra no es suficiente para contrarrestar sobretensiones de origen atmosférico.

Es necesario proveer de un SPDA en las diferentes estructuras para proteger el sistema ante descargas atmosféricas y se debe diseñar un sistema de puesta a tierra adecuado.



Figura 2. Banco de Transformadores

3.2.2. Canaletas Eléctricas. Una de las secciones de mayor importancia, ya que transportan los conductores hacia cada una de las maquinarias. El ambiente en el que se encuentran en su mayoría es de viruta de cartón y por tramos se ven obstruidas por tuberías de vapor, esto deriva a que de ponerse de manifiesto alguna sobretensión de origen atmosférico, se corre el riesgo de producir un incendio a lo largo de las canalizaciones.

El listado de chequeo es el siguiente:

Lista de Chequeo Industria Cartonera Ecuatoriana Canaletas de Corrugadoras e Imprentas					
Fecha:					
Área:					
Responsable:					
Item	Descripción	Sí	No	N/A	Obs.
1	Poseen Sistema de Puesta a Tierra para protección contra descargas atmosféricas?				
2	Se encuentran en buenas Condiciones a lo largo de su recorrido?				
3	Están herméticamente confeccionadas?				
4	A lo largo de su recorrido, obstaculizan o son obstaculizadas por alguna estructura?				
5	Se realiza mantenimiento cada Cierta periodo?				
6	El cableado se encuentra en Buenas condiciones?				
7	Es accesible para trabajos de Mantenimiento o revisión de requerirlo?				

Se deben aterrizar las canaletas para protegerlas de sobretensiones de cualquier tipo, especialmente atmosféricas, prevenimos algún incendio debido a

esto y se contribuye con la equipotencialización de las instalaciones.

3.2.2. Tableros eléctricos de Distribución. Distribuyen la tensión hacia los deferentes puntos de la máquina (corrugadoras e imprentas). Poseen elementos eléctricos y electrónicos y se encuentran cercanos a su respectiva maquinaria.

3.3. Fuentes de sobretensión que afectan las instalaciones que contienen equipos sensibles

Actualmente en casi todas las instalaciones eléctricas de cualquier edificación, los elementos electrónicos se han vuelto una herramienta indispensable en todo proceso, estos equipos trabajan con niveles de tensión muy bajos lo que los hace sensibles a las perturbaciones, mucho más si estas provienen de impactos de descargas atmosféricas.

Las fuentes de sobretensión que podrían afectar las instalaciones de ICESA son:

- Campos electromagnéticos, por maniobras en las instalaciones de alta tensión.
- Sobrecargas, debido a problemas en las transmisiones de las maquinarias.
- Cortes de energía repentinos.
- Impactos directos e indirectos de descargas atmosféricas, resultando ser el de más peligrosidad (no existen registros en ICESA).

3.4. Compatibilidad Electromagnética de Equipos Electrónicos

Habilidad que tiene un dispositivo de funcionar satisfactoriamente en un ambiente electromagnético, es decir, sin sucumbir ante efectos electromagnéticos de otros equipos, ni producir señales electromagnéticas que perturben el funcionamiento de aquellos.



Figura 3. Partes de una interferencia electromagnética

3.5. Perturbaciones ocasionadas por las descargas atmosféricas

Acoplamiento Resistivo.- cuando la descarga atmosférica impacta en zonas cercanas a la instalación, causando una elevación del potencial en los alrededores de la instalación, afectando los SPAT conduciendo corrientes transitorias al interior de la instalación.

Acoplamiento Inductivo.- el impacto de una descarga sobre un conductor del SPDA genera un gran impulso de energía electromagnética, el cual

puede ser absorbido por los cables del interior de la edificación como sobretensiones.

Acoplamiento Capacitivo.- las líneas de alta tensión están expuestas a impactos de descargas, al ocurrir, los dispositivos descargadores de sobretensión disipan parte de la energía, pero una parte viaja por las líneas de distribución y debido a las altas frecuencias se produce el acoplamiento capacitivo a través del transformador hacia los sistemas de potencia, destruyendo cualquier equipo electrónico conectado al mismo.

4. Normas o Estándares para la protección contra descargas atmosféricas

Durante años numerosas organizaciones e instituciones se han dedicado al estudio del fenómeno de las descargas atmosféricas y han emitido normativas con la finalidad de reducir los riesgos a consecuencia de éstas sobre personas, animales y estructuras.

Las normativas de aplicación combinan la experiencia de campo obtenida durante años con pruebas de laboratorio, entre estas normativas tenemos:

- Norma International Electrotechnical Commission (IEC), serie 61024 para la protección externa e interna.
- British Standard BS-6651 para protección externa e interna y la norma francesa NFC muy parecida a la IEC.
- Norma National Fire Protection Association NFPA-780, para protección contra descargas estáticas y tormentas eléctricas en instalaciones con peligro de fuego y explosión, entre otras.

Todas las normas, en mayor o menor grado, aceptan que no existe una protección absoluta.

Para el presente estudio en las edificaciones de ICESA se utilizarán las siguientes normativas para la protección contra el efecto de las descargas atmosféricas:

IEC 61662, de 1995, “Assessment of the risk of damage due to lightning” para determinar el nivel de vulnerabilidad de la estructura a proteger y nivel de eficiencia del SPDA.

IEC 61312, “Protection against Lightning Electromagnetic Impulse”, para determinar las zonas de protección (LPZ) en la estructura a proteger.

IEC 61024, “Protection of structures against Lightning”.

Además para el análisis y valoración de riesgos en las instalaciones de ICESA servirán como base de partida las Listas de Chequeo, Método del Árbol de Fallos y Metodología CEP-UPC.

5. Análisis y Evaluación de Riesgos debido a las descargas atmosféricas

5.1. Importancia de la Evaluación del riesgo

El análisis y la evaluación del riesgo constituyen los factores más relevantes para definir medidas para prevención de riesgos, con una mala aplicación las medidas no evitarán la manifestación de riesgos.

5.2. Análisis y Evaluación de Riesgos en ICESA, utilización de Árbol de Fallos y Metodología CEP-UPC

De las secciones vistas en el capítulo III (Subestaciones secundarias, canaletas eléctricas y tableros de distribución), se evaluarán los factores considerados de mayor riesgo a consecuencia de una descarga atmosférica, estos son:

1. Incendio
2. Descarga eléctrica a personas
3. Daño de equipos

5.2.1. Aplicación del Árbol de Fallos. Parte de la selección de un suceso que se pretende evitar para descomponerlo en sucesos intermedios y determinar las posibles causas que lo han desencadenado.

**Árbol de Fallos para las Subestaciones
Tabla 1. Resultados Obtenidos**

	Probabilidad de ocurrencia
1. Incendio	8%
2. Descarga Eléctrica en personas	6%
3. Daño de equipos	9%

**Árbol de Fallos para Canaletas Eléctricas
Tabla 2. Resultados Obtenidos**

	Probabilidad de ocurrencia
1. Incendio	7%
2. Descarga Eléctrica en personas	1%
3. Daño de equipos	4.5%

**Árbol de Fallos para Tableros de Distribución
Tabla 3. Resultados Obtenidos**

	Probabilidad de ocurrencia
1. Incendio	3.5%
2. Descarga Eléctrica en personas	4%
3. Daño de equipos	4.5%

5.2.2. Aplicación de la Metodología CEP-UPC. Permite la identificación, evaluación y posterior valoración de los riesgos presentes y la definición de

las medidas a tomar. La evaluación se la desarrollará según la metodología del INSHT, tenemos:

$$NR = ND * NE * NC; \text{ nivel de riesgo}$$

Donde: ND: nivel de deficiencia

NE: nivel e exposición; NC: nivel de consecuencias

Además nivel de probabilidad: NP = ND * NC

Tabla 4. Determinación del nivel de deficiencia (NTP 330 - INSHT)

Nivel de Deficiencia	ND	Significado
Muy deficiente (MD)	10	Se han detectado factores de riesgo significativos que determinan como muy posible la generación de fallos. El conjunto de medidas resulta ineficaz.
Deficiente (D)	6	Se ha detectado algún factor de riesgo significativo que precisa ser corregido. El conjunto de medidas se ve reducida de forma apreciable.
Mejorable (M)	2	Se han detectado factores de riesgo de menor importancia. La eficacia del conjunto de medidas preventivas no se ve reducida de forma apreciable.
Aceptable (B)	-	No se ha detectado anomalía destacable alguna. El riesgo está controlado. No se valora.

Tabla 5. Determinación del nivel de riesgo y de intervención (NTP 330 - INSHT)

Nivel de riesgo e Interv. NR = NP * NC	Nivel de probabilidad				
	40 - 24	20 - 10	8 - 6	4 - 2	
Nivel de consecuencias (NC)	100	I 4000-2400	I 2000-1200	I 800-600	II 400-200
	60	I 2400-1440	I 1200-600	II 480-360	II.240 III-120
	25	I 1000-600	II 500-250	II 200-150	III 100-50
	10	II 400-240	II-200 III-100	III 80-60	III-40 IV-20

Se determinarán los niveles de probabilidad y riesgo de acuerdo a las tablas descritas anteriormente para varios eventos que involucra a cada riesgo, tenemos:

Evaluación en Subestaciones

1. INCENDIO

a. Sobretensiones

Nivel de Deficiencia: 2 (Mejorable)

Nivel de Exposición: 1 (Esporádica)

Niveles de Probabilidad: NP = 2 (Baja)

Nivel de Consecuencias: 10 (Leve)

Nivel Riesgo e Intervención: NR = 20 (IV)

No intervenir, salvo que un análisis más preciso lo justifique.

b. Acoplamiento Resistivo

Nivel de Deficiencia: 2 (Mejorable)

Nivel de Exposición: 1 (Esporádica)

Niveles de Probabilidad: NP = 2 (Baja)

Nivel de Consecuencias: 25 (Grave)

Nivel Riesgo e Intervención: NR = 50 (III)

Mejorar si es posible.

2. DESCARGAS ELÉCTRICAS EN PERSONAS

a. Contacto Directo

Nivel de Deficiencia: 2 (Mejorable)

Nivel de Exposición: 1 (Esporádica)

Niveles de Probabilidad: NP = 2 (Baja)

Nivel de Consecuencias: 25 (Grave)

Nivel Riesgo e Intervención: NR = 50 (III)

Mejorar si es posible.

b. Contacto Indirecto

Nivel de Deficiencia: 2 (Mejorable)

Nivel de Exposición: 1 (Esporádica)

Niveles de Probabilidad: NP = 2 (Baja)

Nivel de Consecuencias: 10 (Leve)

Nivel Riesgo e Intervención: NR = 20 (IV)

No intervenir, salvo que un análisis más preciso lo justifique.

3. DAÑOS EN EQUIPOS

a. Sobretensiones

Nivel de Deficiencia: 2 (Mejorable)

Nivel de Exposición: 2 (Ocasional)

Niveles de Probabilidad: NP = 4 (Baja)

Nivel de Consecuencias: 60 (Muy Grave)

Nivel Riesgo e Intervención: NR = 120 (III)

Mejorar si es posible.

Evaluación en Canaletas Eléctricas

1. INCENDIO

a. Sobretensiones

Nivel de Deficiencia: 2 (Mejorable)

Nivel de Exposición: 1 (Esporádica)

Niveles de Probabilidad: NP = 2 (Baja)

Nivel de Consecuencias: 60 (Muy Grave)

Nivel Riesgo e Intervención: NR = 120 (III)

Mejorar si es posible.

2. DESCARGAS ELÉCTRICAS EN PERSONAS

a. Contacto Directo

Nivel de Deficiencia: 2 (Mejorable)

Nivel de Exposición: 1 (Esporádica)

Niveles de Probabilidad: NP = 2 (Baja)

Nivel de Consecuencias: 10 (Leve)

Nivel Riesgo e Intervención: NR = 20 (IV)

No intervenir.

b. Contacto Indirecto

Nivel de Deficiencia: 2 (Mejorable)

Nivel de Exposición: 1 (Esporádica)

Niveles de Probabilidad: NP = 2 (Baja)

Nivel de Consecuencias: 10 (Leve)

Nivel Riesgo e Intervención: NR = 20 (IV)
 No intervenir, salvo que un análisis más preciso lo justifique.

3. DAÑOS EN EQUIPOS

a. Sobretensiones

Nivel de Deficiencia: 2 (Mejorable)
 Nivel de Exposición: 1 (Esporádica)
 Niveles de Probabilidad: NP = 2 (Baja)
 Nivel de Consecuencias: 25 (Grave)
 Nivel Riesgo e Intervención: NR = 50 (III)
 Mejorar si es posible.

Evaluación en Tableros Eléctricos de Distribución

1. INCENDIO

a. Sobretensiones

Nivel de Deficiencia: 2 (Mejorable)
 Nivel de Exposición: 2 (Ocasional)
 Niveles de Probabilidad: NP = 4 (Baja)
 Nivel de Consecuencias: 25 (Grave)
 Nivel Riesgo e Intervención: NR = 100 (III)
 Mejorar si es posible.

2. DESCARGAS ELÉCTRICAS EN PERSONAS

a. Contacto Indirecto

Nivel de Deficiencia: 2 (Mejorable)
 Nivel de Exposición: 1 (Irregularmente)
 Niveles de Probabilidad: NP = 2 (Baja)
 Nivel de Consecuencias: 10 (Leve)
 Nivel Riesgo e Intervención: NR = 20 (IV)
 No intervenir, salvo que un análisis más preciso lo justifique.

3. DAÑOS EN EQUIPOS

a. Sobretensiones

Nivel de Deficiencia: 2 (Mejorable)
 Nivel de Exposición: 2 (Ocasional)
 Niveles de Probabilidad: NP = 4 (Baja)
 Nivel de Consecuencias: 25 (Grave)
 Nivel Riesgo e Intervención: NR = 100 (III)
 Mejorar si es posible.

5.3. Evaluación de Riesgos debido a descargas atmosféricas

La metodología a utilizar para las instalaciones de ICESA es la IEC 61662 de 1995 (citada anteriormente).

Se establecerán los niveles de protección para las estructuras evaluadas, considerando factores como tipo de construcción, zona geográfica, contenido, personal existente, etc. y el riesgo de daño de un equipo sensible viene dado por:

$$R = (1 - e^{-N * P * t}) * \delta$$

5.4. Necesidad de un Sistema de Protección contra descargas atmosféricas

Para el efecto debemos tener claro que:

- Nd: Promedio anual de impactos directos sobre la estructura.
- Nn: Promedio anual de impactos cercanos a la estructura.
- Nk: Promedio anual de impactos sobre las acometidas de servicio.

Las variables a considerar para el cálculo del riesgo aceptable de falla son las siguientes:

- Ra: riesgo aceptable de falla.
- Rj: riesgo calculado para cada uno de los tipos de falla.

Si el riesgo calculado es mayor que el riesgo aceptable de falla, se deberá implementar un SPDA.

5.5. Niveles de Protección de un Sistema de Protección contra descargas atmosféricas

Según metodología IEC 61024-1, tenemos:

Tabla 6. Valores de los parámetros de las descargas atmosféricas de acuerdo al nivel de protección.

Parámetro del rayo	Nivel de Protección		
	I	II	III-IV
Valor pico de la corriente I [KA]	200	150	100
Carga total Q [C]	300	225	150
Carga de impulso Qi [C]	100	75	50
Energía específica W/R [KJ/Ω]	10000	5600	2500
Promedio de paso di/dt [KA/μs]	200	150	100

El valor de la eficiencia del sistema que requiere la instalación, se calcula con la siguiente ecuación:

$$E = 1 - \frac{Ra}{Rj}$$

Tabla 7. Valores de eficiencia en función del nivel de protección (IEC 61024-1-1, 2000, p25).

Nivel de Protección	Eficiencia (E)
I	0.98
II	0.95
III	0.90
IV	0.80
No requiere medidas de protección	<0.80

5.6. Definición de las Zonas de Protección contra descargas atmosféricas

Fundamental para definir el nivel de protección que requiere cada una, tendrán una frontera equipotencial, disminuyendo la corriente transitoria y campos electromagnéticos en el interior.

Según la norma IEC 61312, tenemos:

- LPZ 0A.- La instalación o equipo se encuentra expuesto a impactos directos, el campo electromagnético no es atenuado y deben soportar la corriente total del rayo.

- LPZ 0B.- No esta sujeta a impactos directos, el campo electromagnético no es atenuado. Los componentes deben soportar corrientes.
- LPZ 1.- Zona no expuesta a impactos directos de, las corrientes parciales de rayo son atenuadas. En esta zona y en base a las medidas de blindaje adoptadas puede estar atenuado el campo.
- LPZ 2, 3, etc.- En estas zonas subsecuentes, tanto la corriente como el campo electromagnético son reducidos.

5.7. Análisis del Sistema de Protección contra descargas atmosféricas en ICESA

No existen registros de estudios en las instalaciones de ICESA para proporcionar un SPDA, pero en vista del brusco cambio climático en el planeta, es necesario el mismo, ya que las instalaciones cuentan con equipos sensibles a sobretensiones de este tipo.

Las líneas que transportan tensiones de 13.8 KV (media tensión), poseen descargadores de sobretensión para protección contra sobretensiones transitorias que se presenten, además de contar con transformadores aisladores, supresores de picos, todos éstos no tienen la capacidad suficiente de contrarrestar sobretensiones de origen atmosférico. En el capítulo VIII se realizarán los cálculos.

6. Instalaciones de Puesta a Tierra

6.1. Introducción

Quizás uno de los aspectos de mayor consideración a la hora de diseñar un SPDA, lo conforma el Sistema de Puesta a Tierra (SPAT). Perturbaciones de cualquier tipo deben ser evacuadas a tierra y por lo cual la puesta a tierra debe tener la suficiente capacidad para realizarlo.

Las descargas atmosféricas, como se ha venido hablando, tienen magnitudes muy grandes por lo que las sobretensiones que originan afecta todo tipo de instalación y la integridad de las personas y animales, y para derivar toda esta energía que acompaña a la descarga, nuestro SPAT tiene que estar diseñado de tal manera que evacue a tierra la corriente de la descarga en el menor tiempo posible.

6.2. Objetivos

El principal objetivo es la protección de personas ante posibles intensidades de corriente de fallo de cualquier tipo. Además entre sus beneficios tenemos:

- Mantener una diferencia de potencial baja entre las estructuras metálicas.
- Asegurar una buena protección a tierra de los equipos de la instalación y buen funcionamiento.

- Evacuar las sobretensiones internas que puedan presentarse en la red en cualquier momento, sean estas por maniobras en la operación o provenientes de descargas atmosféricas.

6.3. Definición y partes integrantes de un SPAT

Básicamente en un SPAT intervienen los electrodos de puesta tierra o malla en caso de requerirlo (varillas, jabalinas, etc.), los conductores que se conectan con los diferentes equipos en la instalación, soportes (los que sean necesarios), los diferentes puntos de puesta a tierra y conectores (conectores a presión, abrazaderas, etc.).

Es importante conseguir un bajo valor de resistencia en nuestro SPAT, así tenemos:

- Aumento del número de electrodos.
- Aumento de la longitud de los electrodos.
- Aumento del diámetro de los electrodos.
- Construcción de mallas o zanjas de interconexión.

Siendo ésta última alternativa la que se va utilizar para el diseño de nuestro SPDA.

La resistencia de puesta a tierra para protección contra descargas atmosféricas no debe exceder de 10 ohmios. Toda estructura metálica debe unirse al sistema de mallas por lo menos en dos puntos y las tomas de tierra del pararrayos deben realizarse mediante conductores con calibre mínimo 122 MCM desnudo (1/0 AWG), normativa UNE 21.186.

6.3. SPAT en ICESA

El SPAT en las instalaciones de ICESA, está conformado por electrodos enterrados para cada una de las maquinarias, tableros eléctricos, transformadores y demás equipos existentes, estos electrodos tiene un diámetro de 5/8" y una altura de 2 metros.

En la mayoría de los casos se utiliza conductor # 6 AWG de Cu, para conexión del equipo al electrodo, por ejemplo para los tableros eléctricos se colocan electrodos a una distancia media de 10 cm del cual sobresalen de tierra unos 3 centímetros para colocar el conector o grillete.

7. Sistemas de Protección contra Descargas Atmosféricas (SPDA)

7.1. Sistema externo de protección contra descargas atmosféricas

Dispositivos situados en el exterior de la estructura a proteger con el propósito de captar y derivar la corriente de la descarga atmosférica, lo conforman:

1. Instalación captadora
2. Instalación derivadora y
3. Sistema de puesta a tierra

La **instalación captadora** son las piezas ubicadas encima, laterales o proximidades de la estructura a proteger y que sirven como punto captador de la descarga. Se pueden utilizar métodos como: Ángulo protector, Esfera Rodante y Método de Mallas.

Para las instalaciones de ICESA utilizaremos el Método de la Esfera Rodante, por ser de fácil aplicación y depende de un solo parámetro. Los captores se ubican en los puntos más altos ofreciendo mayor intensificación del campo eléctrico.

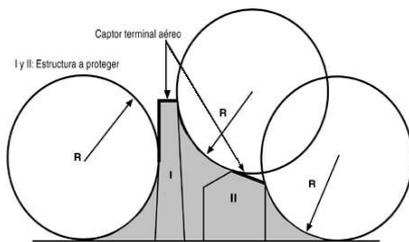


Figura 4. Radio de la esfera rodante R de acuerdo a norma IEC 61024-1

La **instalación derivadora** son conductores bajantes que unen la instalación captadora con el SPAT para conducir la corriente de la descarga hacia tierra. La trayectoria debe ser corta y los conductores según las normativas de instalación citan # 1/0 AWG en el exterior y # 6 AWG para el interior.

El **SPAT** tiene como objetivo garantizar la protección de personas y evacuar a tierra la corriente provocada por las descargas para evitar sobretensiones que puedan dañar los equipos. Se diseña de acuerdo al nivel de protección que requiera la edificación a proteger, como se citó en el cap. VI.

7.2. Sistema interno de protección contra descargas atmosféricas

El objetivo es reducir los efectos que producen las descargas atmosféricas debido a la circulación de la corriente de la descarga en el sistema de protección externa o en las demás partes conductoras de la estructura, también pueden darse sobre cualquiera de las líneas que ingresan al interior de la edificación.

Las estructuras de ICESA, los equipos electrónicos especialmente, poseen supresores de voltaje, existen tomas especialmente para uso electrónico, con el fin de evitar sobretensiones.

7.3. Dispositivos de protección contra descargas atmosféricas, DPS's

Utilizados para disminuir sobretensiones transitorias causados por las descargas atmosféricas y conducirlos a tierra y así evitar daño en el equipo.

Estos DPS's deben asegurar que la corriente sea evacuada hacia la tierra de las zonas externas, así los dispositivos tendrán menos trabajo.

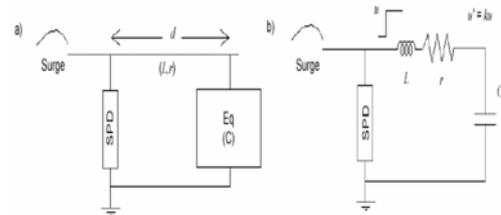


Figura 5. Representación física y esquema eléctrico de un sistema en que el equipo está separado del DPS que lo protege. IEC 61643-12

El número de DPS's dependerá de la clasificación de las zonas de protección en la edificación y del coste de las maquinarias.

7.4. Pararrayos, Sistema de protección contra descargas atmosféricas

7.4.1. Introducción. Fue Benjamín Franklin el pionero en estudiar este fenómeno con la posible teoría de la botella de Lenden donde defendió la hipótesis de que las tormentas son un fenómeno eléctrico proponiendo un método para demostrarlo. Inventó el pararrayos y presentó la llamada teoría del fluido único para explicar los tipos de electricidad positiva y negativa.

7.4.2. Funcionamiento del Pararrayos. Permite definir un sistema de protección contra las descargas atmosféricas para las distintas edificaciones, instalaciones y personal que se encuentra laborando, desviando la corriente de la descarga hacia tierra.

7.4.3. Tipos de Pararrayos. Actualmente los sistemas de pararrayos pueden ser Pasivos y Activos, para la protección en las instalaciones de ICESA se utilizarán del tipo pasivos, por ser los más utilizados en esta zona y estar aprobada por la normativa base de nuestro estudio, IEC 61662.

Entre los pararrayos pasivos tenemos las Puntas de Franklin, las mismas que serán aplicadas en nuestras instalaciones de ICESA, que son electrodos acabados en punta y excitan la descarga para luego canalizarla hacia tierra.

7.4.4. Selección del Pararrayos. Se toman en cuenta características de la estructura, zona geográfica y varios puntos que se mencionan a continuación:

- Tensión de servicio continuo (U_c).
- Tensión asignada de un pararrayos (U_r)
- Corriente de descarga.
- Tensión residual (U_{res}).

8. Proyecto de Aplicación para Industria Cartonera Ecuatoriana

8.1. Levantamiento eléctrico de edificaciones a proteger

Se considerarán tres edificaciones dentro de ICESA, a fin de determinar la necesidad de estos de un SPDA de acuerdo a la normativa IEC 61662 de 1995, tenemos:

8.1.1. Edificio Administrativo. Comprende las oficinas administrativas de la empresa y costa de los siguientes elementos en su interior:

- Centros de cómputo
- Redes de datos.
- Central telefónica
- Centrales de aire acondicionado.
- Puntos eléctricos para fines generales (tomacorrientes, alumbrado, etc.).

La energía que alimenta esta sección proviene del banco de transformadores 3x50 KVA. Las dimensiones del edificio son: a(longitud)=43m, b(ancho)=18m y h(altura)=3,5m.

8.1.2. Edificio de Calderas. Abarca la sala de calderas y el cuarto de transformadores de calderas, en su interior podemos encontrar:

- Motores eléctricos.
- Dispositivos eléctricos de control
- Compresores
- Banco de tres transformadores 3x167 KVA

La energía proviene del cuarto de transformadores 3x167 KVA. Adicional, existen dos tanques de bunker (combustible) a una distancia determinada, que también será considerado para proteger.

Las dimensiones del edificio de calderas son: a (longitud)=32m, b (ancho)=17m y h (altura)=6m.

8.1.3. Edificio de Planta de Manufactura. Se encuentran la mayoría de las maquinarias y cuenta con el mayor número de trabajadores, también se encuentra la subestación de corrugadoras además:

- Tableros eléctricos
- Canalizaciones eléctricas
- Motores eléctricos AC y DC
- Dispositivos eléctricos, electrónicos
- Puntos eléctricos para propósitos generales.

Las dimensiones del edificio son: a(long.)=152,5m; b(ancho)=91,2m y h(altura)=10m.

8.2. Estudio del dimensionamiento y propuestas de mejora

8.2.1. Variables a considerar en la Evaluación del riesgo para ICESA. Los riesgos se evalúan de forma independiente para 5 tipos de fallas. En ICESA se consideran los tipos de falla 1 y 4, éstas son:

- Lesiones o pérdidas de vidas humanas.
- Pérdida que no implican algún elemento humano, cultural o social.

Que nos lleva a la ecuación: $R_j = F_j + \delta_j$, siendo j

los tipos de falla a ser evaluados. Las fallas provocadas son por las siguientes fuentes:

- S1: Tensiones de paso por impactos directos de rayo.
- S2: Incendios, explosiones, efectos mecánicos por impactos directos de rayo.
- S3: Sobretensiones en equipos por impactos directos.
- S4: Sobretensiones por impactos indirectos.
- S5: Incendios, explosiones, efectos mecánicos por impactos indirectos de rayo.

Cada tipo de falla se debe relacionar como:

$$R = R_d + R_i + R_o$$

Donde: $R_d = N_d * P * \delta$ (impactos directos)

$R_i = N_n * P * \delta$ (impactos indirectos)

$R_o = N_k * P * \delta$ (impactos sobre acometidas de servicio)

Además tenemos que: $N_d = N_g * A_e$, $N_n = N_g * A_g$

y $N_k = N_g * A_k$, de donde:

N_g : densidad de rayos a tierra de la zona.

A_e : área efectiva de la edificación a proteger.

A_g : área circunvecina de la edificación.

A_k : área circunvecina de la edificación.

Con todo esto llegamos al cálculo de la frecuencia anual para los diferentes tipos de daños:

Tabla 8. Frecuencia de daño para cada tipo de falla

Tipo de Falla	Frecuencia de daño (Fj)
1	$F1 = H + A + B + C$
2	$F2 = A + D + B + C + E + G$
3	$F3 = A + B + C$
4	$F4 = A + D + B + C + E + G$
5	$F5 = A + B + C$

El nivel cerámico a considerar será $N_g=5$, pudiendo este variar según las condiciones del clima.

8.2.2. Evaluación en Edificio Administrativo. Utilizando las ecuaciones citadas en el apartado anterior tenemos:

$$F1 = 6.2 * 10^{-5}$$

$$\delta1 \approx 0.999$$

$$F4 = 4.2 * 10^{-3}$$

$$\delta4 \approx 0.01$$

Riesgo para F1:

$$R1 = F1 * \delta1$$

Riesgo para F4:

$$R4 = F4 * \delta4$$

$$R1 = (6.2 * 10^{-5}) * (0.999)$$

$$R4 = (4.2 * 10^{-3}) * 0.01$$

$$R1 = 6.1977 * 10^{-5}$$

$$R4 = 4.2 * 10^{-5}$$

8.2.3. Evaluación en Edificio Calderas. Tenemos:

$$F1 = 5.77 * 10^{-4}$$

$$\delta1 \approx 0.999$$

$$F4 = 4.75 * 10^{-3}$$

$$\delta4 \approx 0.02$$

El cálculo de riesgo en esta edificación sería:

$$R1 = F1 * \delta1$$

$$R4 = F4 * \delta4$$

$$R1 = (5.77 * 10^{-4}) * (0.999)$$

$$R4 = (4.75 * 10^{-3}) * 0.02$$

$$R1 = 5.764 * 10^{-4}$$

$$R4 = 9.5 * 10^{-5}$$

8.2.4. Evaluación en Edificio Manufactura. De la misma manera tenemos:

$$F1 = 1.018 * 10^{-3} \quad \delta 1 \approx 1$$

$$F4 = 0.0579 \quad \delta 4 \approx 5 * 10^{-3}$$

Riesgo para F1: $R1 = F1 * \delta 1$

Riesgo para F4: $R4 = F4 * \delta 4$

$$R1 = (1.018 * 10^{-3}) * 1 \quad R4 = (0.0579) * (5 * 10^{-3})$$

$$R1 = 1.018 * 10^{-3} \quad R4 = 2.895 * 10^{-4}$$

8.3. Estudio del sistema actual de protección contra descargas atmosféricas y fortalecimiento de la misma, según normativa IEC

Tabla 9. Riesgo aceptable de falla (IEC 61662, 1995)

Falla	Ra	Tipo de pérdidas
1	10-5	Pérdidas anuales de vidas
2	10-3	Pérdidas anuales de servicio
3	10-3	Pérdidas anuales de patrimonio humano
4 y 5	Criterio del diseñador	Pérdidas que no implican algún elemento humano, cultural o social

Los valores calculados serán comparados con los de la tabla mostrada y definiremos la necesidad y nivel de protección para cada edificación.

Para definir el nivel de protección, se calcula la eficiencia del sistema de la siguiente manera:

$$E = 1 - \frac{Ra}{Rj}$$

Se compara este valor con la tabla del Nivel de Protección según IEC 61024-1-1 (capítulo V).

8.3.1. Nivel de protección para Edificio Administrativo. Los resultados fueron:

$$R1 = 6.1977 * 10^{-5} \text{ y } R4 = 4.2 * 10^{-5}$$

Estos valores comparados con la Tabla 22 sobre el Riesgo aceptable de falla, nos da:

- $R1 > Ra$; siendo $Ra = 10^{-5}$
- $R4 < Ra$; siendo $Ra = 10^{-3}$ (definido según nuestro estudio)

Además se tiene: $E = 1 - \frac{10^{-5}}{6.1977 * 10^{-5}} = 0.8386$

Con estos resultados, la edificación requiere de un SPDA con un nivel de protección IV.

8.3.2. Nivel de protección para Edificio de Calderas. Los resultados fueron:

$$R1 = 5.764 * 10^{-4} \text{ y } R4 = 9.5 * 10^{-5}$$

Y de acuerdo a la tabla del riesgo aceptado de fallas tenemos:

- $R1 > Ra$
- $R4 < Ra$

También: $E = 1 - \frac{10^{-5}}{5.764 * 10^{-4}} = 0.98$

La edificación requiere de un SPDA con nivel I.

8.3.2. Nivel de protección para Edificio de Planta de Manufactura. Los resultados fueron:

$$R1 = 1.018 * 10^{-3} \text{ y } R4 = 2.895 * 10^{-4}$$

Comparando los resultados con la tabla anteriormente mencionada, tenemos:

- $R1 > Ra$
- $R4 < Ra$

Se tiene que: $E = 1 - \frac{10^{-5}}{1.018 * 10^{-3}} = 0.99$

La edificación requiere de un SPDA con un nivel de protección I.

8.4. Aplicación del Método de la Esfera Rodante para las edificaciones a proteger

Con la finalidad de proveer de un SPDA y de acuerdo a los resultados anteriores se aplicará el método de la esfera rodante a cada edificación, donde se utilizarán las siguientes tablas:

Tabla 10. Corrientes máximas y mínimas de la descarga según el nivel de protección, IEC 62305

Nivel de Protección	Imáx (kA)	Imín (kA)	Radio esfera para Imín, R (m)	Probabilidades que Imín no sea superada
I	200	3	20	99%
II	150	5	30	97%
III	100	10	45	91%
IV	100	15	60	84%

Tabla 11. Altura de la punta de acuerdo al nivel de protección, IEC 61024-1

Nivel de Protección	Altura de la punta h (m)	Radio de la Esfera Rodante (m)
I	4	20
II	6	30
III	9	45
IV	12	60

8.4.1. Edificio Administración. Los datos son los siguientes:

- Nivel de Protección: IV
- Radio de la esfera rodante: 60 metros
- Captador: Punta de Franklin
- Altura de la punta: 12 metros
- Distancia entre conductores bajantes: 25 mts
- Calibre del conductor bajante: # 1/0 AWG , Cu

8.4.2. Edificio de Calderas. Los datos son los siguientes:

- Nivel de Protección: I
- Radio de la esfera rodante: 20 metros
- Captador: Punta de Franklin
- Altura de la punta: 4 metros
- Distancia entre conductores bajantes: 10 mts.
- Calibre del conductor bajante: # 1/0 AWG , Cu

8.4.3. Edificio de Planta de Manufactura.

- Nivel de Protección: I
- Radio de la esfera rodante: 20 metros
- Captador: Punta de Franklin
- Altura de la punta: 4 metros
- Distancia entre conductores bajantes: 10 mts.
- Calibre del conductor bajante: # 1/0 AWG , Cu

8.4.4. Cálculo y diseño de la malla de puesta a tierra para las edificaciones a Proteger. Como se citó en el capítulo VI, nos guiaremos de acuerdo al nivel de protección de la edificación, tenemos que:

- Según tabla 13 (Cap. VII, IEC 61024-1), el ancho de la malla es 5 metros para un nivel I.
- El calibre de los conductores bajantes, tanto de las estructuras como el conductor bajante perteneciente al SPDA, será # 1/0 AWG de Cu.
- Se utilizarán 4 electrodos o varillas de Cu.

Tenemos: $R = 0.1047\rho[\Omega]$

Del terreno tenemos que: $\rho = 100[\Omega - m]$

Obteniendo el siguiente resultado: $R = 10.47[\Omega]$

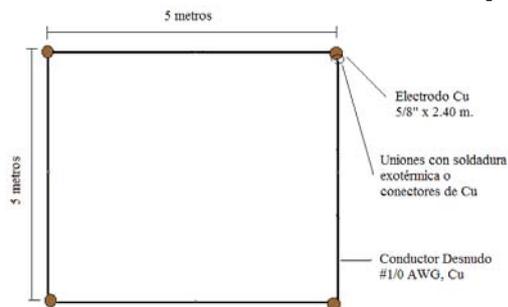


Figura 6. Malla de Puesta a Tierra para las Edificaciones de ICESA

9. Conclusiones y Recomendaciones

Al no existir un SPDA en las instalaciones de ICESA, ésta se encuentra vulnerable de presentarse alguna descarga atmosférica, ya que existen estructuras que contienen elementos sensibles, además se cuenta con un número importante de personas. De acuerdo al método aplicado (IEC 61662, 1995), las estructuras requieren de un SPDA, considerando todos los parámetros y características en cada una de las estructuras evaluadas. El uso de pararrayos para las instalaciones de ICESA ayudará a la captación de posibles descargas atmosféricas y en conjunto con el resto de partes del SPDA, protegerá a las estructuras de sobretensiones por impactos directos e indirectos.

Se recomienda proveer de un SPDA para las instalaciones de ICESA, ya que se cuenta con dispositivos electrónicos en todas las estructuras evaluadas. Como recomendación especial, las estructuras requieren de un sistema de puesta a tierra adecuado para el SPDA, que facilite la disipación de

la corriente de la descarga atmosférica, lo ideal será proveerlas de una malla de puesta a tierra. Los pararrayos, los conductores bajantes y mallas a tierra se deberán realizar y ser instalados de acuerdo a las especificaciones que dictan las distintas normativas.

9. Agradecimientos

Agradecimiento especial a la Industria Cartonera Ecuatoriana S.A., Dpto. de Mantenimiento y Dibujo Técnico, por las facilidades brindadas para el desarrollo de la tesis.

10. Referencias

- [1] Protección Contra Descargas Atmosféricas – Breve Descripción; Miguel Martínez Lozano, mmlozano@usb.ve, <http://prof.usb.ve/mmlozano>
- [2] Elementos de Diseño de Subestaciones Eléctricas de Enríquez Harper
- [3] Protección Interna: Protección de Equipo eléctrico y Electrónico bajo la normativa IEC, Descargas Atmosféricas: 2008, http://www.aadeca.org/cursosyjornadas/cursos_2008/pdf_cano_plata/CLASE_2008_4.pdf
- [4] Comité Técnico de Pararrayos, Presentación de Normas IEC 61024-1, 61024-1-1, 61024-1-2, ya aprobadas para su uso; http://www.cec.cubaindustria.cu/contenido/jornadaVII/1_1.pdf
- [5] Evaluación de Riesgos debido a Descargas Atmosféricas, Metodología IEC 61662-1 http://www.udistrital.edu.co/comunidad/grupos/gipud/produccion_archivos/evaluacion.pdf
- [6] Teoría y Diseño de Sistemas de Tierras Según las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) e IEEE, <http://www.ruelsa.com/notas/tierras/pe70.html>
- [7] Evaluación de riesgos de daños en Sistemas eléctricos de baja tensión por causa de los rayos bajo la Metodología IEC

Visto Bueno

Ing. Juan Gallo Galarza
Director del Tópico de Graduación

Rusbel A. González G. Henry A. Minchala V.
Mat. 199905829 # Mat. 199820614

Fecha: 15/01/2009