



DISEÑO PARA LA IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS DE LA PLANTA DE DOVELAS DE EL LABRADOR " METRO DE QUITO"

DOC. No. HCB-2015-SPDA00110

Contenido

RESUMEN	2
1. ALCANCE	2
2. INSTALACIÓN DEL OBJETO DE ESTUDIO	2
2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL	2
2.2. ANTECEDENTES.....	2
3. JUSTIFICACION Y OBJETIVOS DEL PROYECTO	2
4. NORMATIVA LEGAL VIGENTE.....	3
5. DESARROLLO ESTUDIO.....	3
ESQUEMA GENERAL DEL ESTUDIO	3
5.2 MEDICIONES EN CAMPO.....	3
5.2.1 Mediciones de resistividad de suelos	3
5.2.2.- Analisis de resistividad a partir de mediciones en campo.....	4
5.2.3.-Determinacion de la resistencia de la nueva malla puesta a tierra	5
5.2.4.- Tensión máxima de contacto y paso	5
5.2.5.- Valores tomados para calculos de malla	9
5.3 ANALISIS DE RIESGO.....	10
5.3.1.- Nivel Isoceraunico de la zona	11
5.3.2.- Acciones de Mitigación de Riesgo:	11
5.3.3 Analisis final de Nivel de rieso luego de la implementacion del estudio.....	11
5.4. PROPUESTA DE DISEÑO DEL SPDA.....	12
Sistema de Protección contra Descargas Atmosféricas (SPDA).....	12
5.4.1.- Sistema de captación de rayos	12
5.4.3.- Sistema de puesta a tierra	13
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	13
6.1 CONCLUSIONES.....	13
6.2 RECOMENDACIONES.....	14



RESUMEN

El presente informe se refiere al Estudio del Sistema de Protección contra Descargas (SPDA) de la Planta de Dovelas de EL LABRADOR del Metro de Quito.

Se analizó el nivel de riesgo el cual fue muy bajo una vez implementado el SPDA.

Las acciones de implementación del sistema de protección contra rayos se incluyen en un proyecto de adecuación (ingeniería de detalle) cuyas especificaciones y planos acompañan la presente memoria descriptiva.

1. ALCANCE

El documento contiene: criterios, análisis, cálculos y especificaciones desarrollados como parte del Estudio de Sistema de Protección contra Descargas Atmosféricas a implementarse en Planta de Dovelas EL LABRADOR del Metro de Quito.

2. INSTALACIÓN DEL OBJETO DE ESTUDIO

2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL

La instalación objeto de estudio corresponde a una planta de Producción de Placas constituidas de estructura de acero y recubiertas de hormigón.

2.2. ANTECEDENTES.

No se han presentado impactos por descargas atmosféricas, pero las instalaciones deben estar protegidas si recibieran un impacto directo o indirecto.

3. JUSTIFICACION Y OBJETIVOS DEL PROYECTO

Considerando que la planta EL LABRADOR se encuentra localizada en una zona de Bajo Nivel Cerámico y por consiguiente poco susceptible de afectación por los efectos de la actividad atmosférica sobre su edificación, así se justifica la realización de un estudio que permita determinar las condiciones actuales de operación y posibles medidas para la mitigación de los efectos de la actividad atmosférica en el futuro.

- Definir las recomendaciones y acciones de mitigación de los efectos adversos de las descargas atmosféricas (seguridad personas, instalaciones) con el objeto de garantizar un nivel de riesgo adecuado en conformidad con IEC62305-3.
- Elaboración de un proyecto de ingeniería de detalle para la adecuación del sistema de protección externa contra descargas atmosféricas de acuerdo a las recomendaciones y acciones de mitigación requeridas de modo que la planta opere en un nivel de riesgo adecuado en conformidad con IEC62305-3



4. NORMATIVA LEGAL VIGENTE

Normas Generales:

- [1] INECEL 1973_3481 Código Eléctrico Nacional 2009 Art. 5
- [2] Código de prevención y mitigación de incendios Art. 40.
- [3] IEC-62305 (2008), Protection of Structures against Lightning
- [4] NEC-10 Norma ecuatoriana de la construcción, Parte 9-1, Numeral 10.2.4

5. DESARROLLO ESTUDIO

A continuación se describe el desarrollo de este estudio. En primer lugar se define el esquema general, las consideraciones necesarias para la realización de la auditoría en sitio, el análisis de riesgo, la evaluación del sistema de puesta a tierra y del sistema de protección contra descargas atmosféricas.

ESQUEMA GENERAL DEL ESTUDIO

La evaluación integral del sistema de puesta a tierra y protección contra descargas atmosféricas de la instalación objeto de estudio requiere la elaboración de las siguientes actividades:

- 5.2.- Mediciones en Campo
 - 5.2.1.- Medición de Resistividad de Suelos
 - 5.2.2.- Análisis de Resistividad a partir de mediciones de campo
 - 5.2.3.- Determinación de la Resistencia de la Nueva Malla Puesta a Tierra
- 5.3.- Análisis de Riesgo conforme a IEC 62305-3 de Instalaciones Existentes
 - 5.3.1.- Nivel isoceraunico de la zona
 - 5.3.2.- Acción de mitigación de riesgos
 - 5.3.3.- Análisis final de Nivel de riesgo
- 5.4.- Ingeniería de Detalle del SPDA Externo

5.2 MEDICIONES EN CAMPO

5.2.1 Mediciones de resistividad de suelos

Las actividades de medición de resistividad de suelos e impedancia de Puesta a Tierra utilizando un Telurómetro digital FLUKE 1625 en conformidad con la normativa IEEE Std.81-1983. Los parámetros del suelo se los midieron por el método de Wenner. En el cual están involucradas cuatro picas de prueba de 0.90m para valorar esta medición, la cual se ve reflejada en el cuadro.

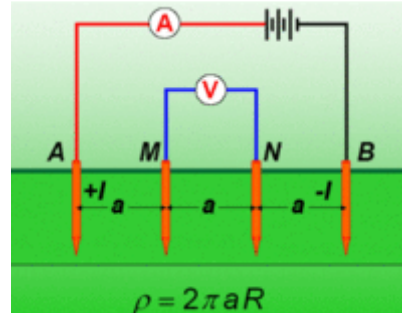


Figura 2.- Aplicación Método Wenner medición de resistencia de suelo

5.2.2.- Analisis de resistividad a partir de mediciones en campo

El analisis de la resistividad se lo hizo mediante la formula:

$$\rho = 2 \times \pi \times a \times R$$

Los resultados se los puede verificar en el cuadro.

SECCION:	PROFUNDIDAD PICAS (B)	SEPARACION PICAS (A)	RESISTENCIA (Ω)	RELACION A/B	RESISTIVIDAD (Ω)
JUNTO A CALLE ISAAC ALBENIZ	0.9	5	1.185	5.556	37.22787295
	0.9	10	1.084	11.111	68.10972873
	0.9	20	0.737	22.222	92.61415143

SECCION:	PROFUNDIDAD PICAS (B)	SEPARACION PICAS (A)	RESISTENCIA (Ω)	RELACION A/B	RESISTIVIDAD (Ω)
PERPENDICULAR A LA CALLE ISAAC ALBENIZ	0.9	5	1.842	5.556	57.86813668
	0.9	10	1.346	11.111	84.57167423
	0.9	20	0.648	22.222	81.43008158

DISTANCIA	ρ SECCION 1	ρ SECCION 2	ρ SECCION 3	ρ SECCION 4	PROMEDIO 1 (Ω)
5	37.22787295	57.86813668			47.54800481
10	68.10972873	84.57167423			76.34070148
20	92.61415143	81.43008158			87.0221165
					70.3036076

5.2.3.-Determinación de la resistencia de la nueva malla puesta a tierra

Para la determinación de la resistencia de la nueva malla puesta a tierra se consideraron aspectos muy importantes como son: el cálculo de la resistividad del suelo expuesto en el **ítem 5.2.2**, el valor de resistencia para estructuras industriales según la norma IEC 62305-3 que es menor o igual a 5 ohmios.

Para el cálculo se utilizaron las siguientes expresiones matemáticas:

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m}$$

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln\left(\frac{2L_c}{a'}\right) + \frac{k_1 \cdot L_c}{\sqrt{A}} - k_2 \right]$$

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_R L_R} \left[\ln\left(\frac{4L_R}{b}\right) - 1 + \frac{2k_1 \cdot L_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right]$$

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln\left(\frac{2L_c}{L_r}\right) + \frac{k_1 \cdot L_c}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right]$$

Para simplificar, adoptamos lo siguiente:

$$k_1 = -0,04 x + 1,41$$

$$k_2 = 0,15 x + 5,5$$

x = Largo / Ancho (lado mayor de la malla / lado menor)

Para cada fórmula:

R1= resistencia de los conductores de la malla en Ω

R2= resistencia del conjunto de jabalinas en Ω

Rm= resistencia de tierra mutua entre el grupo de conductores de la malla, R1, y el grupo de jabalinas, R2 en Ω

P= resistividad del suelo en $\Omega \cdot m$

LC= Longitud total del conductor de la red o malla en m

$$a' = \sqrt{a \cdot 2h}$$

a= radio del conductor en m (diámetro / 2)

A= área cubierta por la malla en m²

Lr= longitud de cada jabalina en m

b= radio de la jabalina en m.

nR= cantidad de jabalinas

5.2.4.- Tensión máxima de contacto y paso

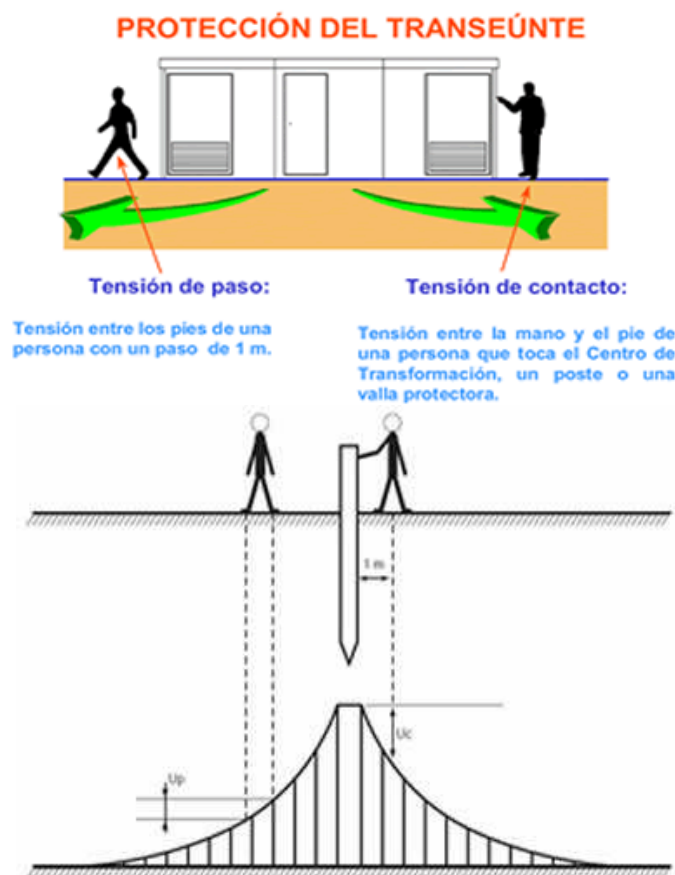
La **máxima tensión de contacto aplicada al cuerpo humano, Vca**, se determina en función del tiempo de duración del defecto, t, según las expresiones de la siguiente tabla:

- Salvo justificación no se consideran tiempos inferiores a 0,1 segundos.
- Si la instalación dispone de reenganche automático rápido (< 0,5 s) el tiempo a considerar será la suma de los tiempos parciales de mantenimiento de la **corriente de defecto**.

Como máxima **tensión de paso** aplicables al cuerpo humano se considera **10 veces** el valor de V_{ca} .

$$V_{pa} = 10 \cdot V_{ca} = \frac{10 \cdot K}{t^n}$$

Partiendo de la fórmula anterior se pueden determinar las **máximas tensiones de paso y contacto admisibles** en la instalación, considerando todas las resistencias que intervienen en el circuito.



A efectos del cálculo del proyecto se puede emplear las siguientes expresiones:

Tensión de paso:

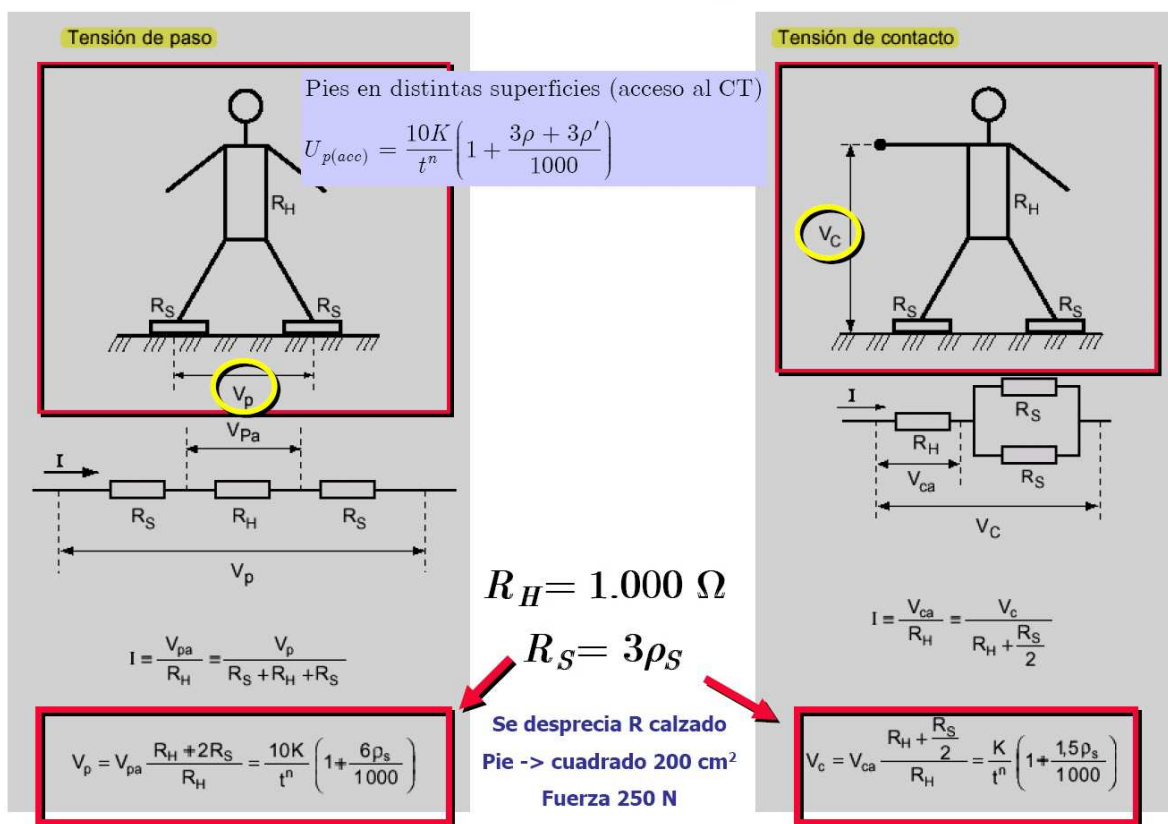
$$V_p = \frac{10 \cdot K}{t^n} \cdot \left(1 + \frac{6 \cdot \rho_s}{1000}\right)$$

Siendo ρ_s la resistividad superficial del terreno ($\Omega \cdot m$).

Tensión de contacto:

$$V_c = \frac{K}{t^n} \cdot \left(1 + \frac{1.5 \cdot \rho_s}{1000}\right)$$

Tensiones máximas correspondientes



CALCULO DE LAS TENSIONES DE CONTACTO Y PASO ADMISIBLES

$$V_p = (1000 + 6 C_s \rho_s) \times \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad V_c = (1000 + 1.5 C_s \rho_s) \times \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

0.116 Persona de 50Kg

0.157 Persona de 70Kg

IB	RB	pa	T PASO (V)	T CONTACTO (V)
0.286641472	1000	0.035151804	186.7019275	186.6565857

Tabla 3.- Calculo de las tensiones de paso y contacto admisibles

CALCULO DE Km, Ki, Ks

$$k_m = \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{D^2}{16hd} \right) + \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6} \cdot \frac{7}{8} \dots \right)$$

n-2 términos

$$k_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \dots \right)$$

k_i es:

$$k_i = 0.65 + 0.172n \quad n \leq 7$$

$$k_i = 2.0 \quad n > 7$$

CALCULO 1	CALCULO 2	CALCULO 3	CALCULO 4	CALCULO 5	CALCULO 6	RESULTADO
0.159154571	3.146369134	-0.14960645				0.35115258
						1.51
0.318309142	0.416666667	0.27027027	0.2	0.133333333	0.1	0.35659227

Tabla 4.- Calculo de factores de correccion

TERMINOS

L TOTAL CONDUCTOR	7.50
ESPACIAMIENTO	2.5
PROFUNDIDAD	1.20
Ki	1.51
Km	0.351152578
Ks	0.356592268
k	0.157
t	0.3
If	1000

TENSION DE PASO REAL

$$E_p = k_s k_i \frac{\rho I}{L}$$

161.0709075 (V)

TENSION DE CONTACTO REAL

$$E_t = k_m k_i \frac{\rho I}{L}$$

157.0883618 (V)

5.2.5.- Valores tomados para calculos de malla

Tiempo de falla $t_s=0.3s$ Valor en el cual el rayo transmite su mayor descarga.

Corriente de falla promedio $I_f=45KA$

Voltaje de falla promedio $V_f=200KV$

ZONA	DIAMETRO CONDUCTOR	PROFUNDIDAD DE MALLA (M)	AREA DE MALLA (M)	NUMERO VARILLAS	DIAMETRO VARILLA (M)	LONGITUD CABLE ENTERRADO (M)	LARGO MALLA (M)	ANCHO MALLA (M)	LONGITUD VARILLA (M)			CONSTANTE	RESISTIVIDAD DEL SUELO ($\Omega \cdot M$)	RESISTENCIA DE LOS CONDUCTORES (Ω)	RESISTENCIA DE LAS VARILLAS(Ω)	RESISTENCIA MUTUA ENTRE VARILLAS Y CONDUCTORES (Ω)	REACTANCIA DE MALLA (Ω)
	d	he	S	NR	DR	Lm	A	B	LR	K1	K2	π	ρ	R1	R2	RM	RG
1	0.014	1.20	15.00	4.00	0.016	7.50	2.50	2.50	2.40	0.54	4.21	3.1416	70.3036076	1.536	1.718	1.284	3.443

5.3 ANALISIS DE RIESGO

Para cada estructura, el riesgo de daño puede estimarse tomando en consideración:

- La frecuencia anual de impactos directos de rayo a la estructura,
- La probabilidad con la cual el rayo causa daño y
- La cantidad promedio de posibles pérdidas que podrían originarse como consecuencia de impacto de rayos a la estructura.

El análisis de riesgo de la instalación se lo realizó en concordancia con IEC 62305-2008.

Las normas IEC 62305 definen 4 niveles de protección, que representan la probabilidad con la cual un SPDA protege un espacio contra los efectos del rayo. La eficiencia de un SPDA se define como la relación entre el número promedio anual de impactos directos de rayo que no causan daño a la estructura y el número total de impactos directos de rayos a la estructura. A continuación se muestra la relación entre el nivel de protección y la eficiencia del SPDA.

Nivel de Protección	Eficiencia del SPDA
I	0.98
II	0.95
III	0.90
IV	0.80

Tabla 1.- Porcentaje de Eficiencia de los niveles de protección según Norma IEC-62305

Concepto teórico para la interpretación de las **tablas 2, 3.**

- 1 e - 01 1 evento en 10 años
- 1 e - 02 1 evento en 100 años
- 1 e - 03 1 evento en 1000 años
- 1 e - 04 1 evento en 10000 años
- 1 e - 05 1 evento en 100000 años

Los niveles de riesgo obtenidos en las condiciones actuales de protección de la planta, conforme a IEC-62305 son los siguientes:

Punto de Incidencia de la descarga eléctrica	Efecto de la descarga eléctrica	Nivel de Riesgo Actual
Impacto directo sobre la estructura	Pérdidas Humanas	0,006
	Pérdidas en Servicios Esenciales	0,012
	Pérdidas Económicas	0,089

Tabla 2.- Niveles de riesgo actuales de la Planta

Los niveles de riesgo (probabilidad de afectación a personas, servicios y pérdidas económicas) obtenidos para el caso de impacto directo en la planta pueden considerarse elevados, no

encontrándose ninguno de ellos dentro de los mínimos recomendados por los 4 niveles de protección establecidos en IEC 62305.

5.3.1.- Nivel Isoceraunico de la zona

Según la evaluación del nivel Isoceraunico, la zona se encuentra en un área de baja influencia de descargas atmosféricas, una valor de 10 por año.

Si realizamos el cálculo sería:

$$Ng=0.1 \cdot Td$$

$$Ng=0.1 \cdot 10$$

$$Ng=1 \text{ descarga/km}^2 \cdot \text{año}$$

De acuerdo a este resultado se puede asegurar lo que se menciona en este numeral.

5.3.2.- Acciones de Mitigación de Riesgo:

Las medidas técnicas de adecuación necesarias para que los niveles de riesgo de daño asociado a actividad atmosférica se ubiquen en el nivel de protección más óptimo para la Planta:

Elaboración de un proyecto de diseño y adecuación del sistema de protección contra rayos externo cuya geometría permita cumplir con el Nivel de Eficiencia (Tipo I, 98%) establecido en conformidad con IEC-62305.

Esta actividad implica la instalación de los sistemas de captación y su conexión a la malla de puesta a tierra requeridos.

5.3.3 Analisis final de Nivel de riesgo luego de la implementacion del estudio

Los resultados indicados en la tabla 2 muestran índices de riesgo que superan los sugeridos por la normativa internacional al respecto. Eso obliga a mejorar los sistemas de protección contra descargas atmosféricas en la Planta (impacto directo en la estructura). Si se implementa un sistema de protección exterior contra descargas atmosféricas correspondiente al Nivel de Protección I en la Planta El Labrador, los riesgos de daño a personas y por explosión son menores, dando como resultado los riesgos de falla indicados en la Tabla 3. Se observa una mejora sustancial en la protección contra descargas atmosféricas por impacto directo.

Punto de Incidencia de la descarga eléctrica	Efecto de la descarga eléctrica	Nivel de Riesgo
Impacto directo sobre la estructura	Pérdidas Humanas	0,00005
	Pérdidas en Servicios Esenciales	0,00011
	Pérdidas Económicas	0,00012
Impacto en tierra, próximo a la estructura	SIN RIESGOS	
Impacto directo sobre una línea eléctrica o similar asociado a la estructura	Pérdidas Humana	0
	Pérdidas en Servicios Esenciales	0,004
	Pérdidas Económicas	0,008

Impacto a tierra, próximo a líneas eléctricas o similar	SIN RIESGOS	
---	-------------	--

Tabla 3.- Riesgos de Fallas Resultantes basado en un Nivel de Protección I

Punto de Incidencia de la descarga eléctrica	Efecto de la descarga eléctrica	Nivel de Riesgo Actual	Factor de Mejora respecto a la situación actual
Impacto directo sobre la estructura	Pérdidas Humanas	0,00005	50,00
	Pérdidas en Servicios Esenciales	0,00011	71,42
	Pérdidas Económicas	0,00012	555,5

Tabla 4.- Factores de mejora luego de alpicar Niveles de Seguridad

En consecuencia, la recomendación básica fundamental es instalar el Sistema externo de protección Contra Descargas Atmosféricas a nivel de toda la Planta de EL LABRADOR ubicada en Quito estos deben estar localizados de acuerdo al Nivel de Protección I.

Examinando detenidamente los resultados mostrados en la **Tabla 3**, los niveles de riesgo disminuirán notablemente esto se debe a la implementación de un correcto sistema de contra descargas atmosféricas.

5.4. PROPUESTA DE DISEÑO DEL SPDA

Sistema de Protección contra Descargas Atmosféricas (SPDA)

Es un sistema completo que se emplea para proteger la vida y la propiedad contra los efectos destructivos del rayo en forma directa o indirecta, dentro de un espacio definido. Un SPDA no puede garantizar protección absoluta a las estructuras, personas u objetos, pero sí reducirá significativamente el riesgo de daño causado por rayos a la estructura protegida.

"Los componentes eléctricos y electrónicos dentro de la estructura requerirán medidas adicionales de protección".

Un SPDA consta de tres subsistemas:

5.4.1.- Sistema de Captación de Rayos, también denominado Sistema de Protección Externo (SPR Externo)

5.4.2.- Sistema de Equipotencialización, también denominado Sistema de Protección Interno (SPR Interno)

5.4.3.- Sistema de Puesta a Tierra (SPAT) para el drenaje de las corrientes de rayo

5.4.1.- Sistema de captación de rayos

Las técnicas de protección convencional mediante captación directa de rayo con puntas del tipo Franklin, se utilizan extensamente alrededor del mundo y su especificación se encuentra recogida en



diversas normas nacionales e internacionales, siendo las más importantes la norma NFPA 780-2005 y la norma internacional IEC 62305-2008.

El diseño del Sistema de Protección contra Descargas Atmosféricas se ha realizado mediante la utilización de 6 captadores de rayo tipo IONIFLASH MACH NG 60 para la parte externa de la planta, 6 PUNTAS TIPO FRANKLIN DE 1.50M para el galpon ya que es una jaula de Faraday con la malla de puesta a tierra tendida en el area y la conexión de sus estructuras, de conductores suspendidos en postes o mástil conectados directamente a la malla de puesta a tierra, conforme a la norma IEC62305. Para ello se ha utilizado el método de las esferas rodantes y cono de protección. Se ha establecido como premisa cumplir con el nivel de protección I, correspondiente a una eficiencia del 98% se han utilizado radios de esfera de 70m.

Con base a la información geométrica disponible en el plano 2D, los planos muestran la localización de los pararrayos y las bajantes de conexión con el sistema de puesta a tierra.

5.4.3.- Sistema de puesta a tierra

El analisis de este sistema se o realizo en el **numeral 5.2.**

Las estructuras deben ser puestas a tierra para conducir las corrientes producidas por descargas atmosféricas y para evitar elevaciones de potencial en la instalación.

Las normas establecen distintos valores de resistencia de puesta a tierra admisible dependiendo si la malla puesta a tierra es utilizada como medio de dispersión de falla a tierra o descargas electroestáticas y de origen atmosférico, tal como se observa en la Tabla 5.

NORMA	DESCARGAS ELECTROESTÁTICAS	PUESTA A TIERRA DEL NEUTRO DEL SISTEMA	DESCARGAS ATMOSFÉRICAS
NFPA 780	NO APLICA	NO APLICA	1-50
IEC 62305-3	NO APLICA	NO APLICA	$R \leq 5$

Tabla 5. – Requerimientos de Resistencia de Puesta a Tierra para Estructuras

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

5.- Los niveles de riesgo obtenidos para el caso de impacto directo en la planta son bastante elevados, requiriéndose una serie de acciones para mitigar dichos riesgos.



6.2 RECOMENDACIONES

Las medidas de adecuación necesarias para que los niveles de riesgo de daño asociado a actividad atmosférica se ubiquen en el nivel de protección I, considerando que se debe preservar la vida humana y los bienes de la Planta de dovelas El Labrador, así lo que se requería era la elaboración de un sistema de protección contra rayos externo cuya geometría permita cumplir con el Nivel de Eficiencia (Tipo I, 98%) establecido en conformidad con IEC62305. Esta actividad implica la instalación de los sistemas de captación y su conexión al sistema de puesta a tierra requeridos para cumplir las condiciones normativas.

Para que el estudio sea completo, se recomienda para cada caso:

"La elaboración de un proyecto de adecuación específico del sistema de protección interno (SPDA Interno) en conformidad con IEC-62305".

"Elaboración de un plan de mantenimiento y adecuación de todas las conexiones de puesta a tierra de estructuras y equipos en toda la planta".

"La elaboración de un proyecto detallado de adecuación integral del sistema de conexionado a tierra de estructuras y equipos se encuentra fuera del alcance de este estudio".

"Realizar el mantenimiento y adecuación de los tableros"