



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**



**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE SALIDAS DE LÍNEAS DE  
TRANSMISIÓN EN ALTA TENSION EN AMBIENTES  
CONTAMINADOS**

# **TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS  
EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**PRESENTA:**

**ISRAEL GÓMEZ FLORES**

**MÉXICO, D. F. DICIEMBRE 2005**



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

*ACTA DE REVISIÓN DE TESIS*

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 17:00 horas del día 26 del mes de Octubre del 2005 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de la E. S. I. M. E. para examinar la tesis de grado titulada:

**"EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE SALIDAS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN EN ALTA TENSIÓN EN AMBIENTES CONTAMINADOS"**

Presentada por el alumno:

**GÓMEZ**

**FLORES**

**ISRAEL**

Apellido paterno

materno

nombre(s)

Con registro: 

A	0	4	0	5	0	0
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante al grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director de tesis

M. EN C. GILBERTO ENRIQUEZ HARPER

DR. DANIEL OLGUÍN SALINAS

DR. DAVID SEBASTIÁN BALTAZAR

M. EN C. TOMÁS ASTAÍN OLIVAREZ

DR. RICARDO OCTAVIO MOYA PALOMINO

M. EN C. DOMITILIO LIBREROS



**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. JIMÉ ROBLÉS GARCÍA



## CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de México, Distrito Federal, el día 26 del mes de Octubre del año 2005, el (la) que suscribe Israel Gómez Flores, alumno(a) del Programa de Maestría en Ciencias con especialidad en Ingeniería Eléctrica, con número de registro A040500, adscrito a la sección de estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección del M. en C. Gilberto Enríquez Harper y cede los derechos del trabajo intitulado: Evaluación del Índice de Salidas de Líneas de Transmisión en Alta Tensión en Ambientes Contaminados, al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben de reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: Civismo No. 77, Col. Las Palmas, C. P. 57440, C. D. Neza, Edo. De México.

[Ing\\_israelgomez@hotmail.com](mailto:Ing_israelgomez@hotmail.com) ó [gilberto.enriquez@cfe.gob.mx](mailto:gilberto.enriquez@cfe.gob.mx)

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Israel Gómez Flores

---

Nombre y firma





---

---

## RESUMEN

Dentro de las fallas que se presentan en las líneas de transmisión y que se denominan como propias, se pueden mencionar las fallas por: descargas atmosféricas, contaminación, hilo de guarda, estructura, herrajes, brecha, aisladores, vientos fuertes, etc.

La contaminación es la segunda causa de falla de aislamientos externos en líneas de transmisión y subestaciones eléctricas, por lo que es necesario estudiar y cuantificar los efectos de la contaminación ambiental sobre estos, para predecir su comportamiento ante condiciones ambientales de contaminación.

En el presente trabajo, se desarrolló un programa computacional en Fortran, que determina la probabilidad de falla de “n” número de cadenas de aisladores en paralelo. Para esto, se empleó la función de densidad normal, que permite tomar en cuenta variables probabilísticas como: la tensión crítica de flameo y el nivel de contaminación.

El efecto de la contaminación sobre los aislamientos externos se simuló empleando una expresión matemática (obtenida de pruebas de laboratorio), que representa el comportamiento de la tensión crítica de flameo en función del nivel de contaminación.

Con los resultados arrojados por el programa se determinó los índices de salidas por efecto de la contaminación.

Por otro lado, se empleó un programa desarrollado por el IEEE denominado FLASH, para evaluar el índice de salidas por efecto de las descargas atmosféricas sobre una línea de transmisión, con el objeto de compararlos con los índices de salida causados por efecto de la contaminación.

---

---

## ABSTRACT

Within the faults that appear in the transmission lines and which they are denominated like own, the faults can be mentioned by: lightning, contamination, shield wire, tower, strong ironworks, breach, insulators, winds, etc.

The contamination is the second electrical cause of fault of outdoor insulations in transmission lines and substations, reason why it is necessary to study and to quantify the effects of the environmental contamination on these to predict the behavior before environmental conditions of contamination.

In the present work, a computational program in Fortran was developed, that determines the flashover probability of "n" number of insulators length in parallel. For this, the function of normal density was used, that it allows to take into account probabilistic variables as: the flashover voltage and the level of contamination.

The effect of the contamination on the outdoor insulations was simulated using a mathematical expression (obtained of laboratory tests), that it represents the behavior of the flashover voltage based on the contamination level.

With the results thrown by the program one determined the flashover rate by effect of the contamination.

Also, a program developed by the denominated IEEE is used FLASH, for evaluates the flashover rate by effect of the lightning on a transmission line, with the intention of comparing them with the flashover rate caused by effect of the contamination.

---

---

# ÍNDICE

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS.	I
CARTA CESIÓN DE DERECHOS.	II
AGRADECIMIENTOS.	III
RESUMEN.	V
ABSTRACT.	VI
ÍNDICE.	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.	X
ÍNDICE DE TABLAS.	XII
SIMBOLOGÍA.	XIII

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.	1
1.2. OBJETIVOS.	3
1.2.1. Objetivo General.	3
1.2.2. Objetivos Particulares.	3
1.3. JUSTIFICACIÓN.	4
1.4. ALCANCE.	6
1.5. ANTECEDENTES.	6
1.6. APORTACIONES.	8
1.7. ESTRUCTURA DE LA TESIS.	9

## CAPÍTULO II: EVALUACIÓN DEL NIVEL DE CONTAMINACIÓN EN AISLAMIENTOS EXTERNOS.

2.1. INTRODUCCIÓN.	10
2.2. EVALUACIÓN DEL NIVEL DE CONTAMINACIÓN EN AISLAMIENTOS EXTERNOS.	10
2.2.1. Pruebas de Campo.	12
2.2.1.1. Método de la Densidad Equivalente de Sal Depositada.	13
2.2.2. Pruebas de Laboratorio.	19
2.2.2.1. Método de Niebla Salina.	20
2.2.2.1.1. Sistema de Pulverización o Rociado.	21
2.2.2.1.2. Procedimiento de la Prueba.	22
2.2.2.1.3. Prueba de Resistencia.	22
2.2.2.1.4. Criterio de Aceptación para la Prueba de Resistencia.	23
2.2.2.2. Método de Niebla Limpia.	23
2.2.2.2.1. Preparación de la Mezcla Contaminante.	23
2.2.2.2.2. Densidad de Depósito de Sal.	24
2.2.2.2.3. Procedimiento de la Prueba.	24
2.2.2.2.4. Criterio de Aceptación para los Procedimientos A y B.	25
2.3. DETERMINACIÓN DE LA TENSIÓN CRÍTICA DE FLAMEO.	27
2.4. DETERMINACIÓN DE LA DISTANCIA DE FUGA.	29
2.5. ASPECTOS GENERALES.	31

---

---

### **CAPÍTULO III: CÁLCULO DEL RIESGO DE FALLA EN CADENA DE AISLADORES EN PARALELO EN AMBIENTES CONTAMINADOS.**

3.1. INTRODUCCIÓN.	32
3.2. MÉTODOS PROBABILÍSTICOS.	32
3.3. ELEMENTOS DE PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA EN EL ESTUDIO DE LA CONTAMINACIÓN EN AISLAMIENTOS EXTERNOS.	33
3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.	37
3.5. MÉTODO PROBABILÍSTICO DE DISEÑO DE AISLAMIENTOS POR CONTAMINACIÓN.	37
3.5.1. Evaluación de la Probabilidad de Falla.	38
3.5.2. Cálculo del Riesgo de Falla.	39
3.6. PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA EVALUAR LA PROBABILIDAD DE FALLA.	40
3.7. RESULTADOS DEL CÁLCULO DEL RIESGO DE FALLA PARA AISLADORES EN PARALELO.	42
3.7.1. Efecto del Número de Cadenas de Aisladores.	43
3.7.2. Efecto del Nivel de Contaminación.	45
3.7.3. Riesgo de Falla.	46
3.7.4. Efecto de la Configuración de la Cadena de Aisladores	50
3.7.5. Índice de Salidas.	55
3.7.6. Distancia de Fuga.	60
3.8. EFECTO DE LA HUMEDAD SOBRE LA TENSIÓN DE FALLA.	63
3.9. ASPECTOS GENERALES.	67

### **CAPÍTULO IV: DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE SALIDAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.**

4.1. INTRODUCCIÓN.	68
4.2. PROBABILIDAD DE FALLA DE LOS AISLAMIENTOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.	68
4.2.1. Teoría de las Descargas Atmosféricas.	69
4.3. ÍNDICE DE SALIDAS.	71
4.4. PROGRAMA FLASH.	71
4.5. RESULTADOS DEL PROGRAMA.	72
4.6. ASPECTOS GENERALES.	75

### **CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS.**

5.1. RESULTADOS DEL PROGRAMA DESARROLLADO EN FORTRAN.	76
5.2. RESULTADOS DEL PROGRAMA FLASH.	77
5.3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS.	78

### **CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

6.1. CONCLUSIONES.	82
6.2. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.	84
Referencias bibliográficas.	86

---

---

## APÉNDICES

A: Teoría de la descargas atmosféricas.	89
B: Programa para determinar la probabilidad acumulativa de falla En cadenas de aisladores en paralelo por efecto de la contaminación.	104
C: Programa para evaluar el efecto de la humedad sobre la tensión Crítica de flameo en aisladores contaminados.	107
D: Programa para calcular la distancia de fuga, empleando aisladores Típicos de la CFE, bajo condiciones de contaminación.	108
E: Archivos de entrada salida de los programas en fortran.	110

---

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Patrones de acumulación promedio de contaminante a largo plazo.	14
Figura 2.2. Variación estacional de la DESD.	15
Figura 2.3. Remoción del contaminante en el aislador.	16
Figura 2.4. Medición de la conductividad eléctrica y temperatura.	17
Figura 2.5. Temperatura – Conductividad de NaCl a 18 °C.	17
Figura 2.6. Concentración – Conductividad de NaCl.	18
Figura 2.7. Tendencia de acumulación de contaminante.	19
Figura 2.8. Cámara de prueba.	26
Figura 2.9. Probabilidad de distribución normal.	27
Figura 2.10. Probabilidad relativa de distribución normal.	27
Figura 2.11. Curva característica de los aisladores contaminados.	28
Figura 3.1. Función de densidad normal.	34
Figura 3.2. Áreas en función de “ $\mu$ ” en términos de la “ $\sigma$ ”.	34
Figura 3.3. Diagrama de bloques para el cálculo de la probabilidad de falla acumulativa de aisladores en paralelo.	42
Figura 3.4. Probabilidad de falla acumulativa para “n” cadenas de aisladores con una DESD = 0.8 mg/cm <sup>2</sup> .	43
Figura 3.5. Probabilidad de falla acumulativa para “n” cadenas de aisladores con una DESD = 0.6 mg/cm <sup>2</sup> .	44
Figura 3.6. Probabilidad de falla acumulativa para 50 cadenas de aisladores bajo diferentes condiciones de DESD.	45
Figura 3.7. Probabilidad de falla acumulativa para 50 cadenas de aisladores para una DESD igual a 0.6 mg/cm <sup>2</sup> . Obtenido con diferente rapidez.	46
Figura 3.8. Riego de falla para “n” cadenas de aisladores para distintos niveles de contaminación.	47
Figura 3.9. Riego de falla para “n” cadenas de aisladores a un valor de DESD de 0.6 mg/cm <sup>2</sup> , obtenido con diferente rapidez.	48
Figura 3.10. Tensión crítica de flameo en función de la DESD para configuración “I”, “V”.	51
Figura 3.11. Probabilidad de falla acumulativa para una DESD = 0.2 mg/cm <sup>2</sup> para una configuración “I”.	51
Figura 3.12. Probabilidad de falla acumulativa para una DESD = 0.4 mg/cm <sup>2</sup> para configuración “I”.	52
Figura 3.13. Probabilidad de falla acumulativa para una DESD = 0.6 mg/cm <sup>2</sup> para configuración “I”.	52
Figura 3.14. Probabilidad de falla acumulativa para una DESD = 0.8 mg/cm <sup>2</sup> para configuración “I”.	53
Figura 3.15. Probabilidad de falla acumulativa para una DESD = 0.2 mg/cm <sup>2</sup> para una configuración “V”.	53
Figura 3.16. Probabilidad de falla acumulativa para una DESD = 0.4 mg/cm <sup>2</sup> para una configuración “V”.	54
Figura 3.17. Probabilidad de falla acumulativa para una DESD = 0.6 mg/cm <sup>2</sup> para una configuración “V”.	54
Figura 3.18. Probabilidad de falla acumulativa para una DESD = 0.8 mg/cm <sup>2</sup> para una configuración “V”.	55
Figura 3.19. Índice de salidas, para “n” cadenas de aisladores, con una DESD = 0.2 mg/cm <sup>2</sup> .	56
Figura 3.20. Índice de salidas, para “n” cadenas de aisladores, con una DESD = 0.2 mg/cm <sup>2</sup> .	56
Figura 3.21. Índice de salidas, para “n” cadenas de aisladores, con una DESD = 0.4 mg/cm <sup>2</sup> .	57
Figura 3.22. Índice de salidas, para “n” cadenas de aisladores, con una DESD = 0.4 mg/cm <sup>2</sup> .	57
Figura 3.23. Índice de salidas, para “n” cadenas de aisladores, con una DESD = 0.6 mg/cm <sup>2</sup> .	58
Figura 3.24. Índice de salidas, para “n” cadenas de aisladores, con una DESD = 0.6 mg/cm <sup>2</sup> .	58
Figura 3.25. Índice de salidas, para “n” cadenas de aisladores, con una DESD = 0.8 mg/cm <sup>2</sup> .	59

---

Figura 3.26. Índice de salidas, para “n” cadenas de aisladores, con una DESD = 0.8 mg/cm <sup>2</sup> .	59
Figura 3.27. Número de aisladores a diferentes niveles de contaminación a una tensión nominal de 400 kV y diferente tipo de aislador.	61
Figura 3.28. Número de aisladores a diferentes niveles de contaminación y diferente tensión nominal, con un mismo tipo de aislador.	61
Figura 3.29. Densidad de absorción de humedad para diferentes niveles de contaminación y RH constante.	64
Figura 3.30. Densidad de absorción de humedad para diferentes niveles de humedad relativa y nivel de contaminación constante.	65
Figura 3.31. Tensión crítica de flameo en función del grado de humedad para diferentes niveles de contaminación.	66
Figura 4.1. Torre de 400 kV tipo 4BC1.	72
Figura 4.2. Índices de salidas por falla de blindaje y flameo inverso para diferentes Ng.	72
Figura 4.3. Índices de salidas por flameo inverso, con diferente RT para diferentes Ng.	73
Figura 4.4. Índices de salidas por falla de blindaje con diferente ángulo de blindaje para diferentes Ng.	74
Figura 5.1. V <sub>50%</sub> en función de la DESD.	78
Figura 5.2. Probabilidad de falla acumulativa en función de la DESD.	79
Figura 5.3. Densidad de absorción de humedad para diferentes niveles de contaminación y RH constante, obtenida con el programa desarrollado en Fortran.	79
Figura 5.4. Densidad de absorción de humedad para diferentes niveles de contaminación y RH constante, Referencia.	80
Figura 5.5. Tensión crítica de flameo en función del nivel de humedad, gráfica obtenida en Fortran.	80
Figura 5.6. Tensión crítica de flameo en función del nivel de humedad, gráfica de referencia.	81
Figura A.1. Mapa mundial de densidad de rayos a tierra por km <sup>2</sup> en un año.	90
Figura A.2. Onda normalizada de impulso de voltaje por rayo.	91
Figura A.3. Voltaje inducido sobre los conductores de fase.	94
Figura A.4. Método de las imágenes para determinar el coeficiente de acoplamiento.	95
Figura A.5. Método de las imágenes para determinar el coeficiente de acoplamiento para dos cables de guarda.	97
Figura A.6. Modelo para determinar el voltaje en la punta de la torre.	100
Figura A.7. Método electrogeométrico.	102

---

---

---

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Nivel de severidad de la contaminación en aisladores externos.	1
Tabla 2.1. Clasificación por regiones según el tipo de contaminante.	11
Tabla 2.2. Niveles de severidad de contaminación, según las fuentes que la producen.	12
Tabla 2.3. Relación entre la salinidad y la conductividad volumétrica.	20
Tabla 2.4. Factor $b$ – temperatura $\theta$ .	21
Tabla 2.5. Relación de las distancias de fuga mínima nominal y los valores de la DESD para cada nivel de contaminación.	30
Tabla 2.6. Factor de incremento de distancia de fuga.	30
Tabla 3.1. Rapidez de cambio de la probabilidad de falla respecto al cambio del nivel de contaminación.	49
Tabla 3.2. Rapidez de cambio de la probabilidad de falla respecto al cambio del número de aisladores.	49
Tabla 3.3. Tipo de aislador y su distancia de fuga.	60
Tabla 3.4. Número de aisladores por nivel de contaminación.	62
Tabla 4.1. Etapas de formación del rayo.	69
Tabla A.1. Resistividades de terrenos.	99

---

---

## SIMBOLOGÍA

A	Área de la Superficie del Aislador [ $\text{cm}^2$ ]
$\alpha$	Ángulo de Blindaje [grad]
b	Factor de Temperatura
C	Concentración Equivalente de Sal [ $\text{mg}/\text{cm}^2$ ]
Ca	Coefficiente de Acoplamiento
DESD	Densidad Equivalente de Sal Depositada [ $\text{mg}/\text{cm}^2$ ]
Dfais	Distancia de Fuga del Aislador [mm]
Dfmm	Distancia de Fuga Mínima Nominal [mm/kV]
Dfn	Función de Densidad de Riesgo de Falla
Dft	Distancia de Fuga Total de la Cadena [mm]
Dm	Diámetro Promedio del Aislador [mm]
DT	Nivel Ceraunico [ $\text{N}^0$ de días con tormenta al año]
$\Delta_0$	Densidad [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
f	Flecha de los Conductores de Fase [m]
fi	Número de Flameos por Cada Nivel de Prueba
h	Altura Equivalente de los Conductores de Fase [m]
hg	Altura de los Cables de Guarda en la torre [m]
I	Magnitud de la Corriente del Rayo [kA]
K	Factor de Corrección de Temperatura
Kb	Factor de Incremento de Distancia de Fuga
m	Densidad de absorción de Humedad [ $\text{mg}/\text{cm}^2$ ]
N	Número de Spays
NA	Número de Aisladores de la Cadena
Ng	Densidad de Rayos a Tierra [ $\text{N}^0$ de rayos / $\text{km}^2$ ]
$\mu$	Media
P(I)	Probabilidad de Ocurrencia de una Corriente de Rayo I [%]
Pf	Probabilidad de Flameo para una cadena de Aisladores [%]
Pfn	Probabilidad de Flameo para n cadenas de Aisladores en Paralelo [%]

---



---

R	Resistividad del terreno [ $\Omega$ - m]
rc	Radio Equivalente de los Conductores de fase [m]
RF	Riesgo de Falla [%]
rc	Radio del Conductor de Fase [m]
rg	Radio del Cable de Guarda [m]
RH	Humedad Relativa [%]
R <sub>T</sub>	Resistencia al pie de la Torre [ $\Omega$ ]
Sa	Salinidad [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\sigma$	Desviación Estándar
$\sigma_0$	Conductividad Volumétrica [S/m]
tc	Tiempo de Cola [ $\mu\text{s}$ ]
tf	Tiempo de Frente [ $\mu\text{s}$ ]
$\theta$	Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]
vc	Voltaje Inducido sobre los Conductores de Fase por Descarga Directa [kV]
vci	Voltaje Inducido sobre los Conductores de Fase por Descarga Indirecta [kV]
Vg	Voltaje que Aparece en los cables de Guarda [kV]
Vi	Valores de Voltajes de Prueba
Vmax	Voltaje Máximo del Sistema [kV]
V <sub>0</sub>	Volumen de Agua Destilada [ $\text{cm}^3$ ]
V <sub>50%</sub>	Tensión Crítica de Flameo [kV]
w	Grado de Humedad [%]
Z	Variable Normalizada
Zc	Impedancia de los Cables de Fase [ $\Omega$ ]
Zg	Impedancia de los Cables de Guarda [ $\Omega$ ]
Vr	Voltaje Reflejado [kV]
Z <sub>0</sub>	Impedancia Característica de la Línea

---



---

---

---

# CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

## 1.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

En las diferentes regiones del país se presentan diversas condiciones de contaminación ambiental, que con el tiempo, se deposita sobre los aislamientos externos de líneas de transmisión y subestaciones eléctricas. Las fuentes de contaminación pueden ser clasificadas de acuerdo al clima, localización geográfica y tipo de contaminante como se indica a continuación [1], [2]:

- Contaminación Rural
- Contaminación Marina
- Contaminación Industrial

Dentro de esta clasificación, se puede localizar la contaminación que se presenta en regiones cercanas al mar industrializadas, pudiendo ser de diferentes tipos, dependiendo de la fuente industrial que la origina: química, petroquímica, metalúrgica, cementera, etc.

El nivel de contaminación en aislamientos externos se cuantifica por los miligramos de contaminante acumulado en cierto tiempo, en un centímetro cuadrado de la superficie del aislador. El nivel de contaminación puede ser clasificado de acuerdo a su severidad como lo describe la tabla 1.1. [3].

Tabla 1.1. Nivel de severidad de la contaminación en aisladores externos.

<b>NIVEL DE CONTAMINACIÓN</b>	<b>(mg/cm<sup>2</sup>)</b>
Muy ligera	Menor que 0.03
Ligera	0.03 – 0.06
Media	0.06 – 0.12
Alta	0.12 – 0.24
Muy alta	0.24 – 0.48
Exponencial	Mayor que 0.48

---

---

La contaminación sobre el aislamiento de una línea de transmisión afecta el nivel de voltaje de ruptura [4]: que es, la tensión de voltaje requerida para romper la rigidez dieléctrica de un material a través del aire en contacto con su superficie.

El voltaje de ruptura de un aislador contaminado es menor que el de un aislador limpio bajo las mismas condiciones climatológicas [5]. Lo cual implica que un aislador contaminado que está operando a un cierto nivel de tensión, tiene un mayor riesgo de flameo (La ocurrencia de una descarga disruptiva sobre la superficie de un dieléctrico en un medio) que si el aislador estuviese limpio.

Por acción del viento y después de un periodo de tiempo, se depositan sobre la superficie del aislador diversos elementos como [6]: sales, polvo, cemento, metales, fertilizantes etc. Formando una capa de contaminante, que al humedecerse por lluvia o por humedad del medio ambiente, se vuelve una capa conductora permitiendo que se presente la circulación de corriente eléctrica a través de ella [7]. Esta a su vez, genera calor provocando evaporación de la humedad contenida en la capa contaminante. Lo cual implica tener una capa de contaminante no uniforme y por tanto una densidad de corriente no uniforme.

La evaporación por calor no es constante, en las zonas con mayor evaporación se forman zonas secas de alta resistencia eléctrica [7]. Ya que la distribución del voltaje que se presenta en el aislador no es uniforme, se generan gradientes de voltaje muy elevados en la superficie del aislador que rompen la rigidez dieléctrica del aire, provocando la presencia de descargas superficiales en los extremos de las zonas secas. A este fenómeno se le conoce como actividad de bandas secas.

Las condiciones de temperatura y humedad del aislador pueden ser tales, que podrían favorecer al fenómeno de bandas secas [2], [7], causando que su duración se alargue, con el riesgo de que las descargas superficiales en el aislador se logren encadenar, provocando flameo completo del aislador estableciendo un arco eléctrico.

La magnitud de la energía asociada a este fenómeno puede ocasionar la falla del aislador, ya sea por ruptura mecánica por daño parcial, que no permita mantener el aislamiento eléctrico mínimo requerido.

---

---

---

---

El proceso de la descarga o flameo en el aislador independientemente del nivel de contaminación que se presente, se puede resumir como sigue:

- Formación de la capa de contaminante.
- Humedecimiento de la capa de contaminante y aumento de su conductividad.
- Secado de la capa de contaminante en las regiones de mayor densidad de corriente.
- Formación de las bandas secas.
- Descargas en las bandas secas y crecimiento de las mismas.
- Descarga total

## **1.2. OBJETIVOS.**

### **1.2.1. Objetivo General.**

En el presente trabajo, se tiene como objetivo el evaluar índice de salidas de líneas de transmisión en alta tensión que se encuentren en ambientes contaminados, simulando el efecto de la contaminación aérea sobre los aislamientos externos empleando un método probabilístico.

### **1.2.2. Objetivos Particulares.**

- Desarrollar un programa en fortran que permita evaluar el efecto de la contaminación sobre los aislamientos externos.
- Determinar la probabilidad de falla acumulativa de “n” cadenas de aisladores en paralelo en función del nivel de contaminación.
- Evaluar el efecto de la humedad ambiental sobre la tensión crítica de flameo de un aislador contaminado mediante un modelo matemático.

- 
- 
- Cuantificar el número de aisladores requeridos para diferentes niveles de contaminación.
  - Determinar el índice de salidas por efecto de la contaminación, para “n” cadenas de aisladores en paralelo, con diferentes configuraciones.
  - Evaluar el índice de salidas por efecto de las descargas atmosféricas sobre una línea de transmisión. Empleando un programa desarrollado por el IEEE denominado FLASH.

### **1.3. JUSTIFICACIÓN.**

La generación, transmisión y distribución de energía eléctrica debe llevarse a cabo de forma continua, segura y al menor costo posible, lo cual implica realizar una eficiente planeación, mantenimiento y control de los equipos asociados a dichos procesos, para así, poder garantizar energía eléctrica de buena calidad y con el menor número de interrupciones. Esto a su vez, plantea la necesidad de disminuir, en la medida de lo posible, el número de fallas que se presentan en líneas de transmisión y subestaciones eléctricas.

Dentro de las contingencias que se presentan en una línea de transmisión por falla propia, según informes de la CFE [8], la contaminación ambiental es la segunda causa de fallas en los aislamientos externos en líneas y subestaciones eléctricas. Por lo cual es necesario estudiar y cuantificar los efectos de la contaminación ambiental sobre los aislamientos externos.

Los aisladores instalados en líneas de transmisión aéreas y subestaciones eléctricas aisladas en aire, están sometidos a las condiciones del medio ambiente en que se encuentran situados, las cuales varían ampliamente de un lugar a otro y depende de las características geográficas y climatológicas en que se encuentre situada la parte de la instalación a observar.

---

---

Estas características provocan que el nivel de aislamiento requerido varíe a lo largo de una misma línea de transmisión [9], pues la severidad de la contaminación es diferente a lo largo de la trayectoria de la misma. Así mismo, la morfología del aislador interviene en, como la contaminación se acumulará en la superficie del mismo.

Aún cuando se tomen medidas para limitar o reducir las emisiones de contaminantes por parte de las fuentes industriales, la contaminación natural es prácticamente imposible de controlar, por lo que se justifica el trabajo de investigación enfocado al diseño y selección de aislamientos adecuados, así como de establecer medidas y procedimientos para la reducción de fallas de flameo por contaminación, bajo las diferentes condiciones meteorológicas y de contaminación que se puede presentar.

Para la evaluación del índice de salidas de una línea de transmisión que se localice dentro de zonas geográficas que presentan un cierto nivel de contaminación, se propone usar un método probabilístico que permita determinar la probabilidad de falla en función del nivel de contaminación. Este método permite considerar las variables probabilísticas que se presentan en el problema de la contaminación sobre los aislamientos externos como: la acumulación del contaminante y el voltaje de flameo como función del nivel de contaminación.

Para evaluar el efecto de las descargas atmosféricas se propone utilizar un programa desarrollado por el IEEE denominado FLASH [10], ya que permite ingresar datos reales de las líneas de transmisión y permite tomar en cuenta variables como resistencia al pie de la torre, tipo de estructura, longitud de las cadenas de aisladores, etc. Que permite obtener resultados confiables de los índices de salidas que pueden provocar las descargas atmosféricas.

Tanto las descargas atmosféricas, como la contaminación ambiental son las causas principales de falla de los aislamientos externos de líneas y subestaciones eléctricas, por lo que su estudio se vuelve imprescindible para evaluar su efecto sobre los sistemas eléctricos de potencia y por tanto para prevenir fallas, de tal forma que permitan mejorar el suministro de la energía eléctrica disminuyendo el índice de salidas por efecto de la contaminación y por descargas atmosféricas.

---

---

#### **1.4. ALCANCE.**

Se hizo un programa computacional en Fortran, para determinar la probabilidad de falla acumulativa en “n” número de cadenas de aisladores en paralelo en función del nivel de contaminación. El programa describe un procedimiento general, que permite ser aplicado a cualquier línea de transmisión considerando diferentes niveles de contaminación.

En base a los resultados arrojados por el programa, se determinó los índices de salida por efecto de la contaminación y se compararon con los índices de salida por descarga atmosférica obtenidos con el programa FLASH.

#### **1.5. ANTECEDENTES.**

A mediados del siglo pasado, la demanda de energía eléctrica ha crecido rápidamente, lo que motivó mejorar la eficiencia de las instalaciones eléctricas reduciendo el número de fallas. Esto motivó la apertura de diferentes líneas de investigación, donde las primeras investigaciones definieron a la contaminación como una de las causas más frecuentes de falla en aislamientos externos (NGK, 1968).

Los aisladores de porcelana comenzaron cuando las alfarerías empezaron a fabricar aisladores para el telégrafo en la década entre 1850 y 1860 [11].

Con el incremento de la demanda de energía eléctrica alrededor de 1880, se necesitaron aisladores más grandes y más fiables para las líneas de alto voltaje. Fred M. Locke empezó a experimentar con mezclas de arcilla que finalmente darían como resultado aisladores más acordes con las nuevas necesidades [11].

Para los años 1960 en Alemania se instalaron aisladores sintéticos conocidos como Poliméricos, presentando varias ventajas sobre los aisladores de vidrio y porcelana como: mayor resistencia mecánica, más livianos y de menor costo y presentan buen desempeño ante la contaminación [12].

---

---

Durante la década de los ochenta, en México se llevó a cabo una investigación por parte del Instituto de Investigaciones Eléctricas y la Comisión Federal de Electricidad. El objeto de la investigación fue desarrollar una metodología para optimizar el diseño de aislamientos externos expuestos en ambientes contaminados, este estudio se realizó por medio de pruebas de campo que permitieron tener información de los valores máximos de contaminación, así como el tipo de contaminante que se presentan en diferentes regiones del país [1].

Para la evaluación de la severidad del nivel de contaminación, se han desarrollado diferentes metodologías que permiten conocer los niveles máximos de la contaminación. Entre las pruebas más usadas se encuentran las siguientes [7]:

- Densidad equivalente de sal depositada
- Conductancia superficial
- Corriente de fuga

Este tipo de pruebas se han llevado a cabo en diferentes laboratorios de todas partes del mundo [7], [11], [12], [5], permitiendo conocer la severidad de la contaminación en la región donde se desarrollan las pruebas.

En lo que se refiere a pruebas de laboratorio, en diferentes partes del mundo se han instalado laboratorios de prueba que simulan la contaminación ambiental sobre los aislamientos externos, con el fin de determinar la tensión crítica de flameo. Estas pruebas varían de laboratorio en laboratorio y los resultados obtenidos se particularizan sobre un cierto tipo de aislador y un cierto tipo de contaminante, que es el predominante en la región de donde se realiza el estudio. Por mencionar algunos tipos de pruebas que se realizan en laboratorios se tienen:

- Pruebas de contaminación por niebla salina
- Pruebas de contaminación por niebla limpia
- Pruebas sobre aisladores contaminados con polvo

En lo que se refiere a los análisis matemáticos que permiten evaluar el efecto de la contaminación sobre los aislamientos, se ha aplicado el “método determinístico” [13].

---

---

En este caso se toma en cuenta un nivel de contaminación máximo, el cual se emplea para determinar un margen de seguridad entre el voltaje de aguante determinado por este método y el voltaje de operación. Este método tiene la desventaja, que tanto el nivel de contaminación y el voltaje de aguante no son valores constantes, si no que tienen una distribución probabilística. Y en el empleo de este método dichas variables se toman como constantes.

En general se puede decir que el estudio de los aislamientos eléctricos por efecto de la contaminación, en su mayoría, se llevan a cabo por medio de pruebas de laboratorio y de campo.

Este tipo de estudios pueden traer buenos resultados, pero se particularizan a una sola región, según en donde se desarrollen las pruebas, y si no se tiene el equipo y la infraestructura necesaria para realizar las pruebas de campo o de laboratorio, puede resultar costoso y tardado.

## **1.6. APORTACIONES.**

Las aportaciones más importantes del presente trabajo son:

- Se desarrolló un programa computacional que permite evaluar el efecto de la contaminación ambiental en los aislamientos externos, determinando la probabilidad de falla acumulativa en “n” cadenas de aisladores en paralelo.
- Se evaluó la probabilidad de falla para diferente número de cadenas de aisladores en paralelo, para distintas configuraciones de aisladores.
- Se determinó el índice de salidas por efecto de la contaminación en los aislamientos externos, tomando en cuenta diferentes niveles de contaminación.
- Se determinó el índice de salidas por efecto de las descargas atmosféricas, empleando un programa computacional denominado FLASH, con el objeto de compararlos con los índices de salida debidos a la contaminación.

---

---

## 1.7. ESTRUCTURA DE LA TESIS.

En el capítulo dos se describe la teoría de la evaluación del nivel de contaminación sobre los aislamientos externos. Describiendo detalladamente las pruebas de campo y de laboratorio empleadas. Donde, además de determinar la severidad y tipo de contaminante que se ha depositado en la superficie de los aisladores expuestos al medio ambiente, se determina en base a estas mediciones la tensión crítica de flameo que presentan los aisladores contaminados. Por otro lado se determina la distancia de fuga necesaria en los aisladores que están sometidos a la contaminación.

El capítulo tres describe el empleo de herramientas matemáticas para evaluar el efecto de la contaminación sobre los aislamientos contaminados. El método probabilístico, es el empleado para determinar la probabilidad de falla acumulativa de los aislamientos de una línea de transmisión que se ve afectada por las condiciones de contaminación.

Se hace una descripción del programa desarrollado en Fortran, que permite determinar la probabilidad de falla de “n” cadenas de aisladores en paralelo contaminados. En base a los resultados arrojados por el programa se determina el índice de salidas por efecto de la contaminación, para diferentes configuraciones de aisladores (I – string, V - string).

En el capítulo cuatro se determina el índice de salidas por efecto de las descargas atmosféricas, empleando un programa desarrollado por el IEEE denominado FLASH.

En el capítulo cinco se hace un análisis de los resultados obtenidos previamente.

En el capítulo seis se presentan las conclusiones del trabajo presentado y las recomendaciones para trabajos futuros.

En el apéndice A, se describe la teoría de las descargas atmosféricas.

En los apéndices B, C, y D, se muestran los códigos en fortran de los programas desarrollados. Y en el apéndice E, se muestran los archivos de entrada y salida de los programas desarrollados en fortran.

---

---

## **CAPÍTULO II: EVALUACIÓN DEL NIVEL DE CONTAMINACIÓN EN AISLAMIENTOS EXTERNOS.**

### **2.1. INTRODUCCIÓN.**

La contaminación ambiental en aisladores externos es una de las causas más frecuentes de falla en líneas y subestaciones eléctricas. La severidad del nivel de contaminación esta dada por el clima y el tipo de contaminante asociados a la región de estudio.

En general, el comportamiento de un aislador bajo condiciones de contaminación en un sistema eléctrico está en función de [1]:

- La cantidad de contaminante acumulada en un periodo de tiempo determinado en la superficie del aislador.
- La distribución del contaminante en la superficie del aislador.
- La naturaleza del contaminante.

Los factores anteriormente mencionados están en función de las condiciones locales de contaminación, factores climatológicos, localización geográfica del sitio, así como de la forma y posición del aislador.

Dentro de los factores climatológicos que intervienen en el comportamiento de los aisladores se puede mencionar: humedad, temperatura y presión.

### **2.2. EVALUACIÓN DEL NIVEL DE LA CONTAMINACIÓN EN AISLAMIENTOS EXTERNOS.**

Para evaluar el efecto que tiene la contaminación sobre los aislamientos externos de una línea de transmisión es necesario realizar los siguientes pasos:

- Pruebas de Campo.
- Pruebas de Laboratorio.

---

---

Con los resultados obtenidos de las pruebas de campo y de laboratorio es posible obtener la tensión crítica de flameo en función de la contaminación.

Para poder predecir el comportamiento de los aisladores que se encuentran contaminados por el medio ambiente que los rodea, es necesario conocer la cantidad y naturaleza del contaminante así como la meteorología del lugar. Con este fin son instaladas diversas estaciones de prueba [1], donde se colocan aisladores expuestos al medio ambiente durante un tiempo lo suficientemente largo para que su valor de contaminación llegue a estabilizarse. Las estaciones se localizan en diferentes regiones del país caracterizadas por su alto nivel de contaminación y la cantidad de fallas atribuibles a flameo por contaminación.

Las regiones donde son localizadas las estaciones de prueba se clasifican de acuerdo al tipo de contaminación que se puede presentar en el lugar, ya sea por fuentes naturales o por fuentes industriales. En la tabla 2.1, se muestra una clasificación de los diferentes tipos de contaminante que se encuentran en el país, de acuerdo a la región donde se presentan [1]:

Tabla. 2.1. Clasificación por regiones según el tipo de contaminante.

<b>REGIÓN</b>	<b>TIPO DE CONTAMINANTE</b>
Meseta	Rural e Industrial
Golfo de México y Mar Caribe (Cálido Sub-Húmedo)	Marino e Industrial
Golfo de México (Estepario)	Marino
Océano Pacífico (Cálido Sub-Húmedo)	Marino e Industrial
Océano Pacífico (Estepario)	Marino

FUENTE: CFE Y EL IIE

La acumulación del contaminante en la superficie de un aislador depende de dos procesos: primero se transporta y deposita el contaminante en el aislador, y por otra, las condiciones ambientales remueven al contaminante. Tal que, el efecto de los dos procesos da como resultado la cantidad de contaminante depositado en el aislador.

---

---

De este modo se puede caracterizar la acumulación del contaminante por:

- Un estado inicial.
- Una tasa de crecimiento.
- Tendencia.
- Tipo y valor del estado final.

Los niveles de severidad de contaminación pueden ser clasificados de acuerdo a las fuentes que la producen [9], de acuerdo a la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Niveles de severidad de contaminación, según las fuentes que la producen.

<b>LIGERA</b>	*Áreas sin industrias y con baja densidad de casas equipadas con calefacción. **Áreas con baja densidad de industrias o casas pero sujetas a fuertes vientos y/o lluvias ***Áreas agrícolas y montañosas Estas áreas deben estar situadas por lo menos a 10 – 20 km del mar y no deben estar expuestas a vientos directos del mar.
<b>MEDIA</b>	*Áreas con industrias que no producen humo contaminante y/o con una densidad promedio de casas equipadas con calefactor. **Áreas con alta densidad de casas y/o industrias pero sujetas a vientos y/o lluvias. ***Áreas expuestas a vientos del mar pero no demasiado cerca.
<b>ALTA</b>	*Áreas con alta densidad de industrias y suburbios de grandes ciudades con alta densidad de equipos de calefacción que producen contaminación. ** Áreas cercanas al mar o expuestas a fuertes vientos del mar.
<b>MUY ALTA</b>	*Áreas de extensión moderada sujetas a polvos conductores y a humos industriales que producen gruesos depósitos de polvo conductores. **Áreas de extensión moderada muy cercanas a la costa y expuestas a la brisa del mar o a vientos contaminantes y muy fuertes provenientes del mar. ***Áreas desérticas caracterizadas por grandes periodos sin lluvia, expuestas a vientos muy fuertes que llevan arena y sal y sujetas a condensación regular.

### 2.2.1. Pruebas de Campo.

A nivel internacional existen diversos métodos que permiten conocer la severidad de la contaminación que se presenta en un aislador previamente expuesto al medio ambiente en una estación de prueba o de forma natural. En el caso particular de México se optó por aplicar el método llamado “Densidad Equivalente de Sal Depositada”, el cual se describe a continuación.

---

---

### **2.2.1.1. Método de la Densidad Equivalente de Sal Depositada.**

El grado de contaminación que se presenta en los aislamientos externos de una línea o subestación eléctrica, se puede medir aplicando el método de la Densidad Equivalente de Sal Depositada (DESD).

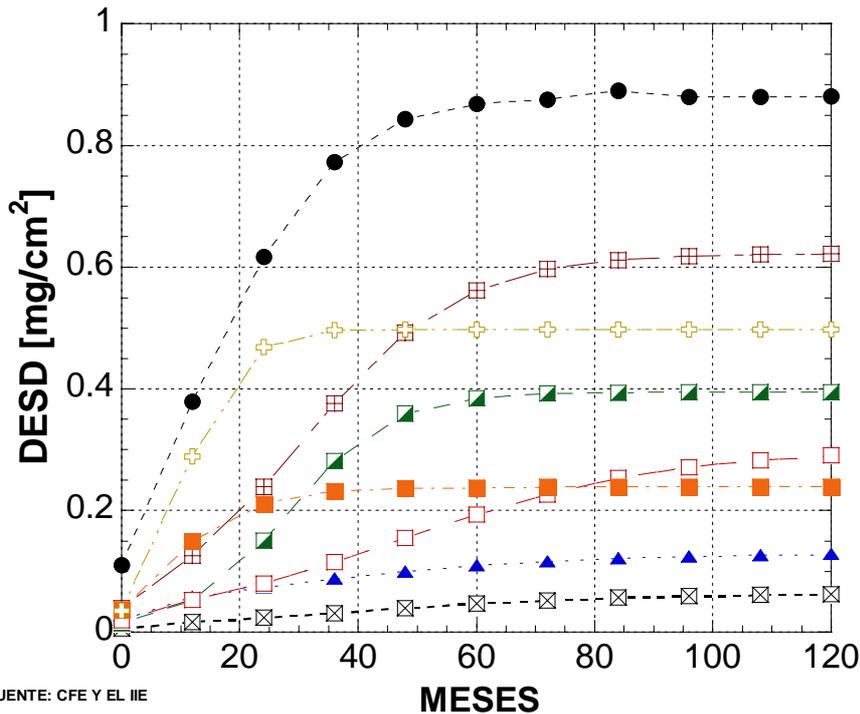
Como definición de la DESD se tiene que [7], [16]: Es el depósito equivalente en miligramos de sal (NaCl) por centímetro cuadrado de la superficie del aislador, que tiene una conductividad eléctrica igual al verdadero depósito de contaminante disuelto en la misma cantidad de agua.

La medición de la DESD debe realizarse con los tipos de aisladores que se encuentran instalados en las líneas y subestaciones eléctricas que se encuentran en operación, pero con el propósito de comparar la severidad de contaminación entre diferentes zonas son usados aisladores estándar tipo disco (254 mm X 146 mm), ya sea en posición vertical u horizontal [17], [18].

Dicho método consiste en retirar el contaminante que se ha depositado en la superficie del aislador para su posterior análisis. Los pasos a seguir se describen a continuación [1], [7], [18]:

- 1.- Como primer paso se procede a retirar el contaminante de los aislamientos, previamente expuestos al medio ambiente en líneas, subestaciones o estaciones de prueba, donde se desee conocer el nivel de contaminación. Se recomienda tomar al menos tres muestras por cada periodo de exposición.

- 2.- Seleccionar el periodo de exposición mínimo que permita obtener datos confiables. Para esto, se procede a tener diferentes patrones de acumulación promedio de contaminante a largo plazo, según la zona o región de que se trate como se muestra en la figura 2.1. La evaluación de la cantidad de contaminante acumulado y distribución en la superficie de un aislador debe realizarse por un periodo de tiempo lo suficientemente largo, tal que permita que la cantidad de contaminante depositado en el aislador se estabilice, este periodo es por lo regular mayor a 60 meses [1].



FUENTE: CFE Y EL IIE

- x-- MESETA: RURAL
- MESETA: INDUSTRIAL
- ▲-- GOLFO - ESTEPA: MARINO
- PACIFICO: MARINO
- PACIFICO: INDUSTRIAL
- GOLFO - CARIBE: INDUSTRIAL
- +-- PACIFICO - ESTEPA: MARINO

Figura 2.1. Patrones de acumulación promedio de contaminante a largo plazo.

3.- Se define la época del año crítica. La cual se presenta durante la época llamada de secas, que es cuando más contaminante se acumula, en consecuencia las muestras deben ser tomadas justo unos días antes de que inicien las lluvias.

Para describir este concepto se presenta en la figura 2.2, las mediciones de DESD por promedio mensual en un año, que permite observar el comportamiento del proceso de contaminación en los aisladores que son colocados en estaciones de prueba, localizadas en diferentes zonas geográficas del País.

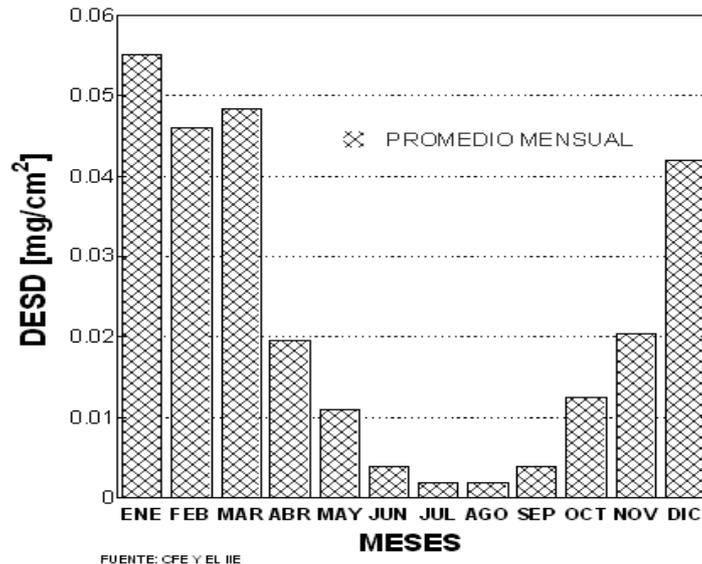


Figura 2.2. Variación estacional de la DESD.

Además de la variación de la DESD en función del tiempo, se debe tomar en cuenta las características geográficas y de contaminación del lugar donde fueron realizadas las mediciones, como:

- Localización geográfica
- Altura sobre el nivel del mar
- Pluvial
- Lluvia
- Temperatura
- Tipo de contaminante
- Valor inicial de contaminación
- Tendencia de la acumulación del contaminante
- Valor máximo que alcanza el nivel de contaminación

En la figura 2.2, podemos observar que los valores mínimos de acumulación de contaminante se presenta entre los meses de mayo a septiembre, este comportamiento se puede explicar con el hecho de que según las características geográficas de la zona las lluvias se presentan entre los meses mayo – septiembre. Por lo que se presenta el fenómeno de lavado, debido a las lluvias que remueven parcialmente el contaminante antes depositado en el aislador.

---

Los meses críticos donde se presenta el nivel más alto de depósitos de contaminante se presentan en Diciembre y de Enero a Marzo. Siendo Enero el mes que tiene el nivel de contaminación más alto.

Una vez que se ha logrado definir el periodo de exposición y la época crítica del año se procede a:

Primero: Con ayuda de una espátula o brocha, agua de baja conductividad (menos de 3 microsiemens por centímetro) y con un volumen de 300 a 500 ml, se lleva a cabo la remoción de los contaminantes. Retirando solo el polvo depositado sobre la porcelana o vidrio, excluyendo las partes metálicas.

En el caso de aisladores tipo suspensión se debe tomar dos muestras, una para la superficie superior y otra para la inferior. En los tipo alfiler y subestación solo se toma una muestra que incluye ambas superficies. Lo anterior se describe en la figura 2.3.

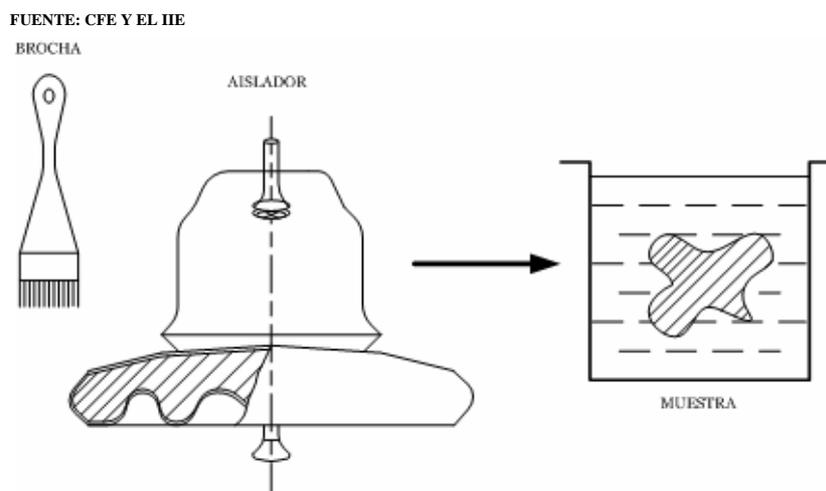


Figura 2.3. Remoción del contaminante en el aislador.

Una vez que se ha retirado el contaminante del aislador a la disolución que lo contiene se le mide su conductividad eléctrica, su temperatura y volumen, como se indica en la figura 2.4.

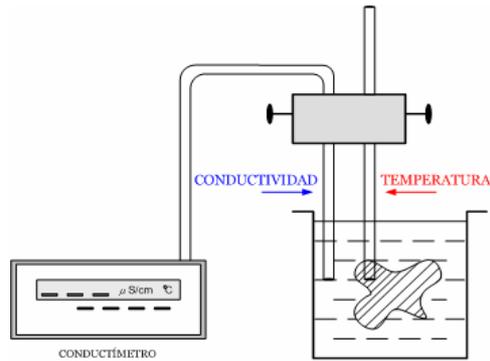


Figura 2.4. Medición de la conductividad eléctrica y temperatura.

Segundo: Como siguiente paso, se procede a calcular el valor de la DESD, como se describe enseguida:

a.- La conductividad eléctrica de la muestra del contaminante se corrige a una temperatura de 18 °C, utilizando la figura 2.5.

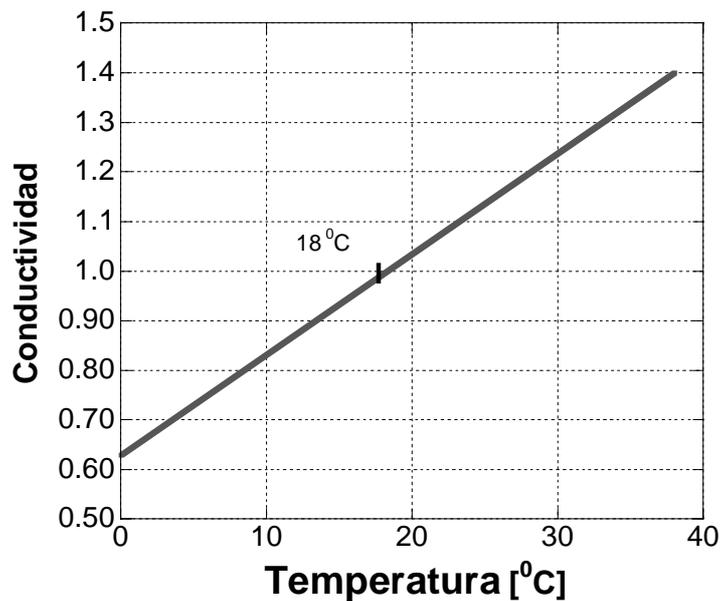


Figura 2.5. Temperatura – Conductividad de NaCl a 18 °C.

b.- Una vez corregida la temperatura, se obtiene la conductividad de la disolución del contaminante, restándole la conductividad del agua utilizada para la remoción del contaminante.

c.- Se hace otra corrección, para la concentración equivalente de la muestra, pero con Cloruro de Sodio (NaCl), empleando la figura 2.6.

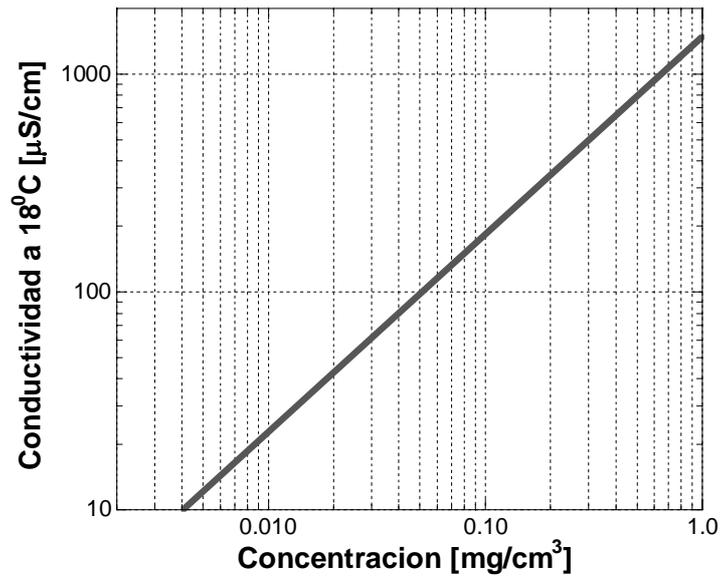


Figura 2.6. Concentración – Conductividad de NaCl.

d.- Finalmente se calcula la DESD empleando la ecuación 1.

$$DESD = \frac{C * V_0}{A} \quad (1)$$

Donde :

DESD : Densidad equivalente de sal depositada [mg/cm<sup>2</sup>]

C : Concentración equivalente de sal depositada [mg/cm<sup>3</sup>]

V<sub>0</sub> : Volumen de agua destilada utilizada para lavar el aislador [cm<sup>3</sup>]

A : Área geométrica de la superficie del aislador [cm<sup>2</sup>]

Los datos obtenidos de la DESD por experimentación de campo se pueden representar en función del tiempo [19], como se muestra en la figura 2.7.

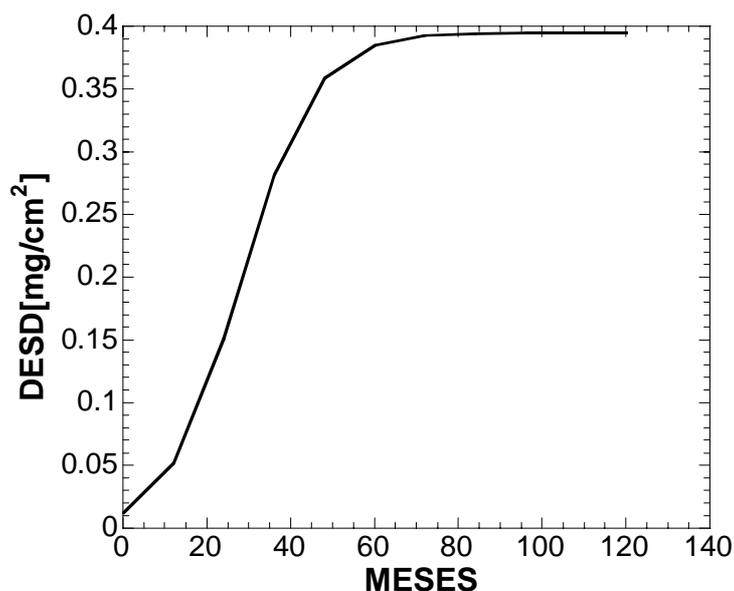


Figura 2.7. Tendencia de acumulación de contaminante.

En la figura 2.7, se describe el comportamiento de acumulación del contaminante en los aisladores externos sometidos a la contaminación ambiental, durante un tiempo lo suficientemente largo, tal que permite que se establezca el nivel de contaminación.

### 2.2.2. Pruebas de Laboratorio.

La curva característica de un aislador, voltaje de flameo contra nivel de contaminación, describe su comportamiento eléctrico bajo condiciones de ambientes contaminados. Esta curva se obtiene a partir de la reproducción de laboratorio de las condiciones de contaminación y ambientales que se presentan en el campo. A nivel internacional las pruebas de laboratorio de contaminación artificial más comunes son [20]:

- Niebla Salina
- Niebla Limpia

El voltaje de aguante de un aislador contaminado se puede obtener realizando pruebas de laboratorio o de campo. La razón por la que se prefiere aplicar las pruebas de laboratorio es que ahorran tiempo de investigación y dinero. A continuación se describen las pruebas de laboratorio mencionadas.

---

---

### 2.2.2.1. Método de Niebla Salina.

En este método los aisladores limpios sin contaminar se energizan y se someten a un proceso de niebla salina que se produce por atomización de agua, la cual tiene un valor determinado de salinidad. Este método se aplica en principio a los aisladores que van a trabajar en áreas costeras, en las cuales los aisladores se ven expuestos a la brisa marina. El método de niebla salina es de los más usados y representativos debido a que [18]:

- El flameo de los aisladores contaminados se presenta más frecuentemente en la presencia de humedad fuerte (sin llegar a lavar al aislador).
- El método es bastante flexible ya que, es posible variar la cantidad de contaminante y el nivel de humedad cuando sea necesario de acuerdo a la información del sitio por simular.
- Es práctico indicar el nivel de contaminación en términos de la DESD para la determinación del voltaje de aguante en función de ésta.

La solución de Sal es preparada con NaCl (de pureza comercial). Los valores de salinidad que debe tener la solución se muestra en la tabla 2.3, así como la relación entre ésta y la conductividad volumétrica y la densidad de la solución a una temperatura de 20°C. Cuando estos valores no se encuentran a 20°C deben ser corregidos [20].

Tabla 2.3. Relación entre la salinidad y la conductividad volumétrica.

<b>SALINIDAD</b> Sa [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>CONDUCTIVIDAD VOLUMÉTRICA</b> $\sigma_{20}$ [S/m]	<b>DENSIDAD</b> $\Delta_{20}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
2.5	0.47	-
3.5	0.60	-
5	0.83	-
7	1.15	-
10	1.6	-
14	2.2	-
20	3.0	-
28	4.1	1018.0
40	5.6	1025.9
56	7.6	1037.3
80	10	1052.7
112	13	1074.6
160	17	1104.5
224	20	1140.0

EC 507

La conductividad volumétrica se puede calcular de acuerdo a la ecuación 2.

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta} [1 - b(\theta - 20)] \quad (2)$$

Donde :

$\theta$  : Temperatura de la solución [ $^{\circ}$ C]

$\sigma_{\theta}$  : Conductividad volumétrica a la temperatura de  $\theta^{\circ}$ C

$\sigma_{20}$  : Conductividad volumétrica a la temperatura de  $20^{\circ}$ C

b : Factor que depende de la temperatura  $\theta$ , ver tabla 2.4

Tabla 2.4. Factor b – temperatura  $\theta$ .

$\theta$ [ $^{\circ}$ C]	b
5	0.03158
10	0.02817
20	0.02277
30	0.01905

Por otra parte la corrección de la densidad se hace de acuerdo a la ecuación 3, [20].

$$\Delta_{20} = \Delta_{\theta} [1 + (200 + 1.3Sa)(\theta - 20) \times 10^{-6}] \quad (3)$$

Donde :

$\theta$  : Temperatura de la solución [ $^{\circ}$ C]

$\Delta_{\theta}$  : Densidad a la temperatura de  $\theta^{\circ}$ C

$\Delta_{20}$  : Densidad a la temperatura de  $20^{\circ}$ C

Sa : Salinidad [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

#### 2.2.2.1.1. Sistema de Pulverización o Rociado.

La niebla es producida dentro de la cámara de pruebas por medio de un número determinado de pulverizadores (sprays), que con la ayuda de boquillas rocían al aislador sometido a la prueba. Las boquillas deben ser de materiales resistentes a la corrosión y la salinidad. Los sprays deben estar colocados en dos columnas paralelas en lugares opuestos al aislador, el cual debe estar en el mismo plano que las columnas a una distancia entre las boquillas y el aislador de 3.0 m con un  $\pm 0.05$  m de tolerancia. Los pulverizadores deben estar separados 0.6 m. El número mínimo de sprays por columna debe ser para una cadena H en metros del aislador, según la ecuación 4, [20].

---

---

$$N = \frac{H}{0.6} + 3.0 \quad (4)$$

Antes de comenzar la prueba deben cumplirse algunas especificaciones, entre las que se encuentran, que el aislador debe estar limpio. Al empezar la prueba el aislador debe estar en equilibrio térmico con el aire de la cámara de prueba. Al mismo tiempo la temperatura ambiente no debe ser menor a 5 °C y no mayor a 40 °C. El aislador es energizado, la bomba que aplicara la solución contaminante y el compresor del aire son encendidos.

#### **2.2.2.1.2. Procedimiento de la Prueba.**

El voltaje de prueba es aplicado al aislador a la salinidad de referencia por un periodo de 20 minutos o hasta que el aislador flamee. Si el aislador no falla el voltaje se aumenta en pasos de 10% del voltaje de prueba cada 5 minutos hasta el flameo.

Una vez presentado el flameo el voltaje se reduce y se vuelve a elevar cuidadosamente hasta un 90% del voltaje de falla obtenido previamente, para después aumentarlo en pasos de 5% del voltaje de falla inicial cada 5 minutos, hasta alcanzar el flameo. Ya que han ocurrido 9 flameos se despeja la niebla de la cámara.

#### **2.2.2.1.3. Prueba de Resistencia.**

El objeto de esta prueba es confirmar la salinidad resistente especificada del aislador a un voltaje de prueba específico. Esta prueba se realiza una vez que el aislador y la cámara alcancen las condiciones iniciales.

Una serie de pruebas son desarrolladas al aislador a un voltaje de prueba usando la solución salina dada. La duración de la prueba debe ser de 1 hora. Si el aislador no falla antes de este tiempo se dice que el aislador pasa la prueba y entonces el aislador debe ser lavado cuidadosamente antes de cada prueba subsecuente.

---

---

#### **2.2.2.1.4. Criterio de Aceptación para la Prueba de Resistencia.**

Si el aislador no presenta flameo durante el desarrollo de 3 pruebas consecutivas, el aislador pasa la prueba. Si solo ocurre una falla, una cuarta prueba debe de realizarse, hasta entonces el aislador pasará la prueba en caso de que no se presente el flameo.

#### **2.2.2.2. Método de Niebla Limpia.**

Los aisladores contaminados, secos, se les aplica un voltaje de prueba y se someten a la niebla producida por agua. La técnica de producir la niebla limpia varía de laboratorio en laboratorio. Este procedimiento consiste básicamente en:

##### **2.2.2.2.1. Preparación de la Mezcla Contaminante.**

Esta mezcla contiene cantidades fijas de sal, agua y un medio inerte que puede ser:

- Kieselguhr
- Kaolin (o Tonoko)

Para llevar a cabo la contaminación acordada en la prueba del aislador, se tiene una tolerancia de  $\pm 15\%$  a un apropiado valor de la conductividad de la solución preparada.

La medición de la conductancia superficial es realizada en el aislador durante su humectación, con el propósito de determinar su valor máximo.

Esta medición consiste en aplicar al aislador un voltaje no mayor a 700 V r.m.s. por metro de la distancia de fuga total, midiendo la corriente a través de la capa húmeda. La conductividad superficial debe estar a una temperatura de 20°C de acuerdo a la ecuación 5.

$$K_{20} = K_{\theta} [1 - b(\theta - 20)] \quad (5)$$

---

---

Donde :

$\theta$  : Temperatura de la solución  $^{\circ}\text{C}$

$K_{\theta}$  : Conductividad superficial a la temperatura de  $\theta^{\circ}\text{C}$

$K_{20}$  : Conductividad superficial a la temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$

b : Factor que depende de la temperatura  $\theta$

#### **2.2.2.2.2. Densidad de Depósito de Sal.**

El contaminante es removido de la superficie del aislador y se disuelve en una cantidad conocida de agua, la solución se agita por 2 minutos antes de medir su conductividad volumétrica  $\sigma_{\theta}$  [S/m] a una temperatura de  $\theta^{\circ}\text{C}$ , después se valúa  $\sigma_{20}$  haciendo la corrección de valores como se indicó anteriormente.

La salinidad  $Sa$  [ $\text{kg}/\text{cm}^3$ ] de la solución se determina, cuando  $\sigma_{20}$  se encuentra en el rango de  $0 - 0.04 - 0.4$  [S/m] con la ecuación 6.

$$Sa = (5.7\sigma_{20})^{1.03} \quad (6)$$

La densidad equivalente de sal se determina aplicando ecuación 7.

$$DESD = \frac{Sa * V_0}{A} \quad (7)$$

Donde :

$V_0$  : Es el volumen de la solución [ $\text{cm}^3$ ]

A : Área de la superficie del aislador [ $\text{cm}^2$ ]

#### **2.2.2.2.3. Procedimiento de la Prueba.**

Para el desarrollo de la prueba se pueden seguir dos procedimientos, los cuales se describen a continuación:

---

---

### **Procedimiento A: Humectación Antes y Durante la Energización.**

En este procedimiento el aislador es contaminado usando una solución de Kaolin (o Tonoko), el grado de contaminación es expresado en términos de la conductividad superficial, pero también se puede usar la densidad de sal depositada. Por medio de un generador de niebla se humedece la capa contaminante, las boquillas dispersoras son espaciadas equidistantemente una de otra.

El rango de la niebla de la cámara se aplica a una temperatura ambiente normal durante 20 – 40 minutos. Después el voltaje de prueba se aplica instantáneamente o después de un tiempo no mayor a 5 segundos y se mantiene hasta que se alcance el flameo, o por 15 minutos si no ocurre.

El aislador es retirado de la cámara durante un tiempo lo suficientemente necesario para que el aislador se haya secado. Este es colocado por segunda vez dentro de la cámara de prueba y rehumedecido por la niebla hasta que la conductividad superficial alcance su máximo valor. El voltaje de prueba es aplicado y se mantiene hasta el flameo o durante 5 minutos en caso de que no ocurra falla. No más de 2 pruebas consecutivas deben ser realizadas a un aislador con la misma capa contaminante.

### **Procedimiento B: Humectación Después de la Energización.**

El procedimiento de preparación del aislador es el mismo que en el procedimiento A. El vapor de salida de la cámara debe de ser cero hasta que el voltaje de prueba es aplicado, para después ser constante, a temperatura ambiente normal. La salida de vapor debe estar en el rango de 0.05 kg/h,  $\pm 0.01$  kg/h por m<sup>3</sup> del volumen de la cámara de prueba. El voltaje de prueba se mantiene hasta el flameo.

#### **2.2.2.2.4. Criterio de Aceptación para los Procedimientos A y B.**

El objeto de esta prueba es confirmar el grado de resistencia específica a la contaminación a un voltaje de prueba especificado. El aislador cumple con la prueba si ni ocurre la falla durante 3 pruebas consecutivas, según los procedimientos indicados.

---

En la figura 2.8 se muestra un esquema de la cámara de pruebas [20], donde:

1. Caldera de baja presión
2. Calentador eléctrico
3. Válvula reguladora de alimentación de agua
4. Tubo regulador de presión
5. Bomba que alimenta a la caldera
6. Conexión de alimentación de agua
7. Conexión para el compresor de aire
8. Válvula reguladora de compresión de aire
9. Calibrador de presión
10. Válvula de compresión de aire a control remoto
11. Boquilla inyectora
12. Tubo de boquilla múltiples
13. Boquillas internas
14. Cámara de plástico
15. Objeto de prueba

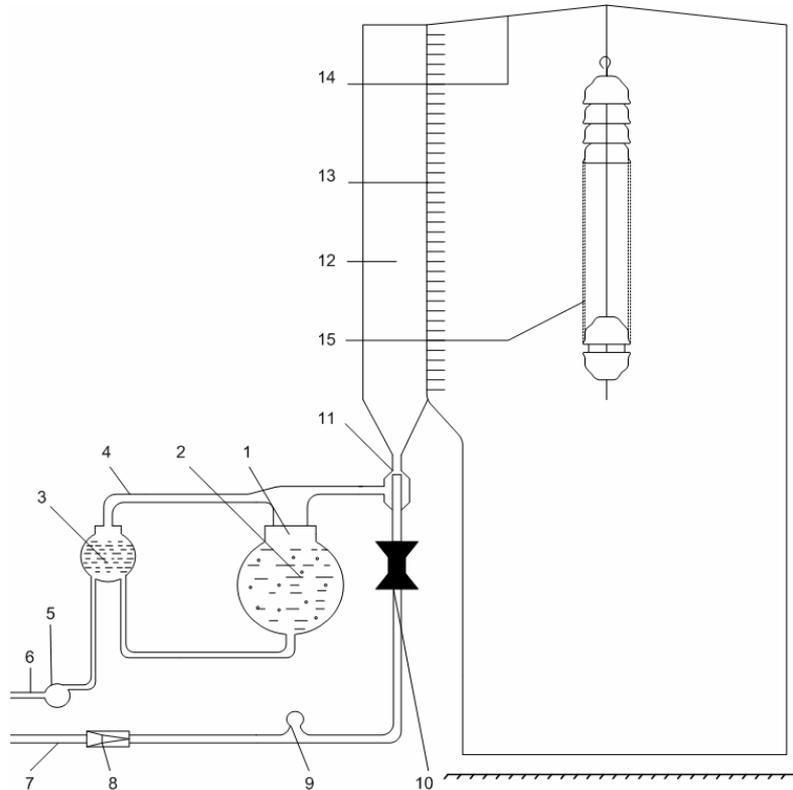


Figura 2.8. Cámara de prueba.

---

---

### 2.3. DETERMINACIÓN DE LA TENSIÓN CRÍTICA DE FLAMEO.

Uno de los aspectos importantes que se estudian para los aislamientos externos contaminados es la tensión de aguante, que es una cantidad que se determina de forma experimental en pruebas de laboratorio (Niebla Limpia, Niebla Salina).

La Tensión de aguante o tensión crítica de flameo es un concepto probabilístico que corresponde a una probabilidad de distribución normal de Gauss, pero el valor que se establece tiene una probabilidad de falla del 50%. Esta cantidad se puede verificar en aislamientos externos a partir de la tensión crítica de flameo.

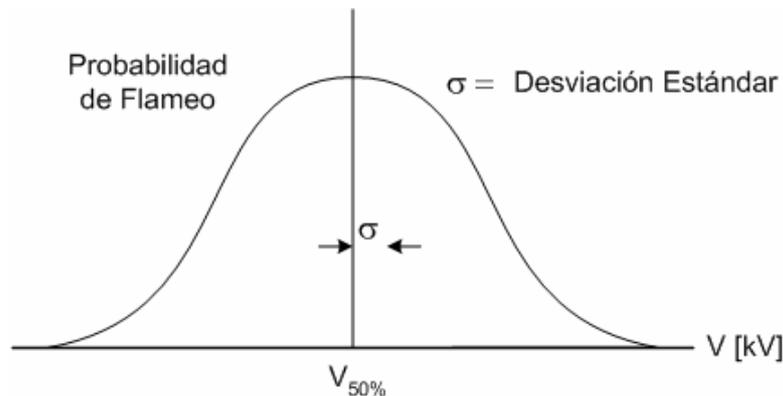


Figura 2.9. Probabilidad de distribución normal.

La figura 2.9, muestra la probabilidad de distribución normal para el cálculo de la tensión de aguante, aunque solo es ilustrativa ya que en realidad se aplica la curva de probabilidad relativa, la cual se muestra en la figura 2.10.

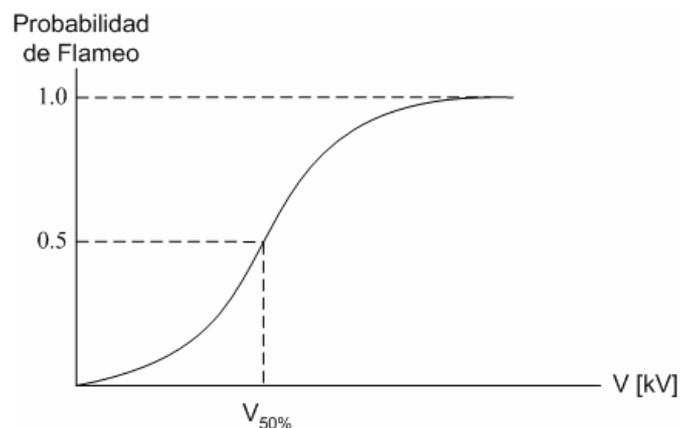


Figura 2.10. Probabilidad relativa de distribución normal.

Para la obtención del  $V_{50\%}$ , de forma experimental, debe tomarse en cuenta el número total de pruebas, así como el número de fallas por cada voltaje aplicado a cierta cadena de aisladores afectada por la contaminación. En general se puede decir que, se aplica un número total  $n$  de pruebas para cada tensión, de estos valores de tensión se anotan aquellos que provocan flameo de tal manera que se determina el número de fallas  $n_k$ . De esta información se puede determinar el  $V_{50\%}$  como se indica en la ecuación 8, [20].

$$V_{50\%} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i V_i}{n_k} \quad (8)$$

Donde :

$n$  : Número total de pruebas

$n_k$  : Número de flameos totales

$f_i$  : Número de fallas por cada nivel de prueba

$V_i$  : Valores de los voltajes de prueba

Existen diferentes pruebas normalizadas para determinar el voltaje crítico de flameo, como los descritos en las pruebas de laboratorio de niebla limpia y niebla salina. La curva característica que se obtiene de la tensión de aguante en función del nivel de contaminación expresada como la DESD es de la forma, como se indica en la figura 2.11.

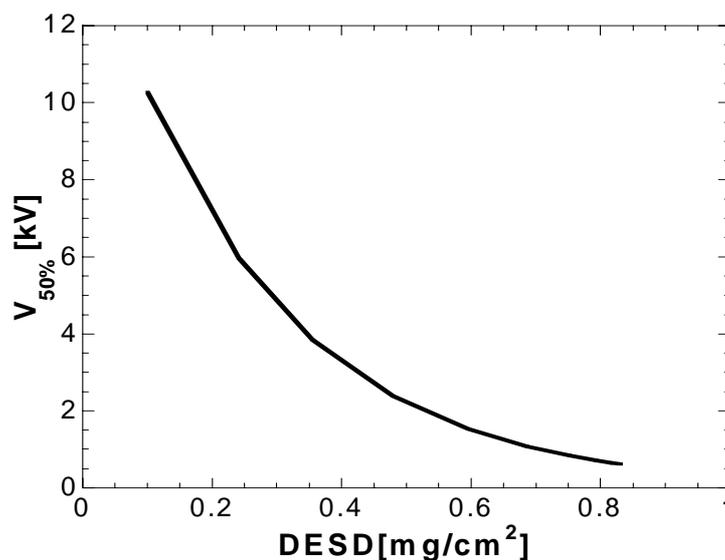


Figura 2.11. Curva característica de los aisladores contaminados.

---

---

De las gráficas anteriores se pueden obtener las expresiones matemáticas que describan el  $V_{50\%}$  en función de la DESD y su correspondiente desviación estándar, aplicando un método de ajuste de curvas, como se indica en las ecuaciones 9 y 10, [22].

$$V(DES D) = 15.08 * 46.78^{-(DES D)} \quad (9)$$

$$\sigma(DES D) = 0.125 + 0.5(DES D) + 105(DES D)^2 \quad (10)$$

Donde :

$V(DES D)$  : Voltaje crítico de flameo en función de la DESD [kV]

$\sigma(DES D)$  : Desviación estándar en función de la DESD

DES D : Densidad equivalente de sal depositada [ $\text{mg}/\text{cm}^2$  ]

Con la expresión 9, se puede determinar el voltaje de aguante en función de la DESD y simular el efecto de la contaminación sobre los aislamientos externos.

#### **2.4. DETERMINACIÓN DE LA DISTANCIA DE FUGA.**

Otro de los aspectos que hay que considerar en los aisladores contaminados es la distancia de fuga. La distancia de fuga de un aislador es la distancia más corta, o la suma de las distancias más cortas, a lo largo del contorno de las superficies externas del material aislante (porcelana, vidrio, etc.), [21].

La distancia específica de fuga de fase a fase o de fase a tierra, se define como la relación entre la distancia de fuga total del aislamiento y el voltaje máximo de fase a fase del sistema o de fase a tierra respectivamente.

Para la selección del número de aisladores que se utilizan en cadenas expuestas a ambientes contaminados, se considera que la distancia específica de fuga de la cadena debe ser igual o mayor a la distancia específica de fuga mínima nominal para cada nivel de contaminación [9].

En la tabla 2.5, se muestra la relación de entre la distancia específica de fuga nominal y la Densidad Equivalente de Sal Depositada asociados para cada nivel de contaminación.

Tabla 2.5. Relación de las distancias de fuga mínima nominal y los valores de la DESD para cada nivel de contaminación.

NIVEL DE CONTAMINACIÓN	DESD [mg/cm <sup>2</sup> ]	DISTANCIA ESPECÍFICA DE FUGA MÍNIMA NOMINAL [mm/kV]	
		FASE – FASE	FASE - TIERRA
LIGERA	0.03 – 0.06	16	28
MEDIA	0.10 – 0.20	20	35
ALTA	0.30 – 0.60	25	43
MUY ALTA	> 0.80	31	54

La distancia de fuga mínima nominal de un aislamiento situado entre fase y tierra se determina según el nivel de contaminación del sitio, esta relación se expresa con la fórmula 11.

$$D_{ft} = D_{fmm} * V_{max} * K_D \quad (11)$$

Donde :

$D_{ft}$  : Distancia de fuga total de la cadena [mm]

$D_{fmm}$  : Distancia de fuga mínima nominal [mm/kV]

$V_{max}$  : Voltaje máximo del sistema [kV]

$K_D$  : Factor de incremento de distancia de fuga, respecto al diametro del aislador, ver tabla 2.6.

$D_m$  : Diámetro promedio [mm]

Tabla 2.6. Factor de incremento de distancia de fuga.

DIÁMETRO PROMEDIO [mm]	$K_D$
$D_m < 300$ mm	1.0
$300 > D_m < 500$ mm	1.1
$D_m > 500$ mm	1.2

Para determinar el número de aisladores de la cadena se emplea la expresión 12.

$$NA = \frac{D_{ft}}{D_{fais}} \quad (12)$$

Donde :

NA : Número de aisladores de la cadena

$D_{ft}$  : Distancia de fuga total de la cadena [mm]

$D_{fais}$  : Distancia de fuga del aislador [mm], tomado del catálogo del fabricante.

---

---

## 2.5. ASPECTOS GENERALES.

El dimensionamiento y selección de aislamientos externos expuestos en ambientes contaminados, debe considerar las diversas variables involucradas en el fenómeno de flameo.

Para poder realizar la selección del tipo de aislador, así como la determinación de la distancia de fuga requerida, es necesario contar con la información del sitio donde se localizarán los aisladores como: nivel, tipo y proceso de contaminación para así poder definir el método de diseño adecuado (estadístico, dinámico).

El estudio que se presenta, bajo el objetivo de evaluar el efecto de la contaminación en aislamientos externos de una línea de transmisión, tiene como propósito el disminuir el número de salidas de servicio de una línea o subestación provocadas por la severidad del nivel de contaminación que se pudiere presentar en cierta región.

Las medidas que se pueden adoptar para dicho propósito, por mencionar algunas, se puede mencionar la corrección de la distancia de fuga en los aisladores, mejoramiento de los programas de mantenimiento, y/o sustitución de aislamientos con condiciones no óptimas para trabajar bajo ambientes contaminados.

El estudio del efecto de la contaminación en aislamientos externos tiene como razón de ser que: ante los avances tecnológicos de nuestro país el proceso de transmisión y distribución de energía eléctrica se ve sujeta a cambios en sus instalaciones y metodologías de trabajo, que conllevan a la reducción del índice de salidas, para poder garantizar la continuidad y el adecuado funcionamiento de las líneas de transmisión.

---

---

## **CAPÍTULO III: CÁLCULO DEL RIESGO DE FALLA EN CADENA DE AISLADORES EN PARALELO EN AMBIENTES CONTAMINADOS.**

### **3.1. INTRODUCCIÓN.**

De los datos que se obtienen de las pruebas de campo de la densidad equivalente de sal depositada y de las pruebas de laboratorio como el voltaje crítico de flameo en función del nivel de contaminación, se obtiene información de los aisladores en forma individual. Mientras que, en el campo se encuentran instalados un número finito de cadenas de aisladores en paralelo que corresponden a una misma línea de transmisión y a un mismo nivel de contaminación. Por lo que resulta necesario aplicar herramientas matemáticas a los datos obtenidos con la finalidad de reproducir los eventos que se presentan en campo para un número determinado de aisladores contaminados.

El diseño de aislamientos por contaminación ha sido estudiado utilizando el método determinístico, en el cual primero se considera un valor máximo de severidad de contaminación para después fijar un margen de seguridad entre el voltaje de aguante y el voltaje de operación del sistema.

Sin embargo, tanto el nivel de contaminación como el voltaje de aguante son variables probabilísticas [15]. Donde el voltaje de falla sigue una distribución probabilística normal, lo que nos lleva a aplicar el método probabilístico.

### **3.2. MÉTODOS PROBABILÍSTICOS.**

Cuando ocurre una sobretensión en un sistema eléctrico, existen diversos factores que pudieron haber ocasionado la alteración como: una descarga atmosférica, una maniobra de interruptores o por presencia de la contaminación.

En todos estos casos existe una característica de naturaleza aleatoria en el fenómeno, que produce un cierto riesgo de que se produzca la falla, a esto se le conoce como riesgo de falla.

---

---

Para el caso de las sobretensiones, relaciona la magnitud de la sobretensión con la tensión resistente del aislamiento. A este método de determinar el nivel de aislamiento se le denomina *método probabilístico* y permite en teoría un dimensionamiento óptimo del aislamiento [19].

El uso de este método presupone el conocimiento estadístico de las sobretensiones aplicadas y las características probabilísticas de la tensión disruptiva en los aislamientos.

Para el estudio que se presenta en este trabajo, se aplicará el método probabilístico, con el fin de aprovechar la información estadística con la que se cuenta de los niveles de contaminación.

### **3.3. ELEMENTOS DE PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA EN EL ESTUDIO DE LA CONTAMINACIÓN EN AISLAMIENTOS EXTERNOS.**

La probabilidad y estadística son herramientas matemáticas que se aplican a los estudios de las técnicas de las altas tensiones, como la determinación de la influencia de la contaminación en la tensión resistente a los aislamientos externos.

El concepto de estadística se refiere al manejo de datos o información de eventos ocurridos, como el crecimiento de la contaminación en los aislamientos, esta información permite realizar estudios como análisis probabilístico de ciertos eventos.

Como se ha mencionado anteriormente los datos que se obtienen del estudio de la contaminación son del tipo de distribución normal de Gauss. Esta distribución es un modelo matemático que describe el modelo de distribución, de manera tal que la función de densidad de probabilidad normal está dada como la ecuación 13, [23], [24].

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad -\infty < x < \infty \quad (13)$$

---

---

Donde :

$\sigma$  : Desviación estándar

$\mu$  : Media

Lo anterior se representa como se muestra en la figura 3.1.

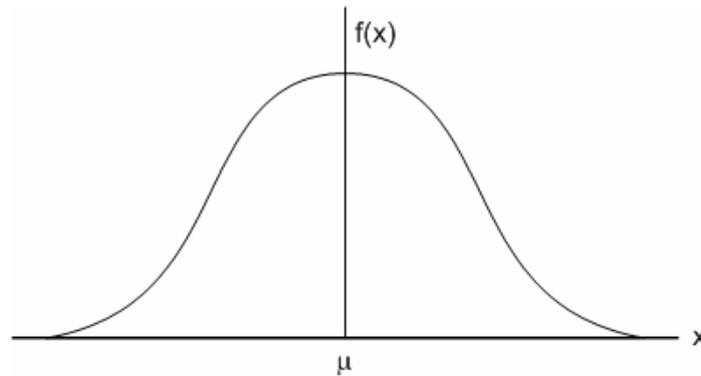


Figura 3.1. Función de densidad normal.

La función de densidad normal es simétrica con respecto a " $\mu$ ", por lo que solo se necesita tabular el área de un solo lado de la media. Las áreas tabuladas son áreas a la derecha de los valores de " $Z$ ", donde " $Z$ " es la distancia de un valor de " $x$ " respecto a la media, expresada en unidades de desviación estándar. Esta área se muestra en la figura 3.2.

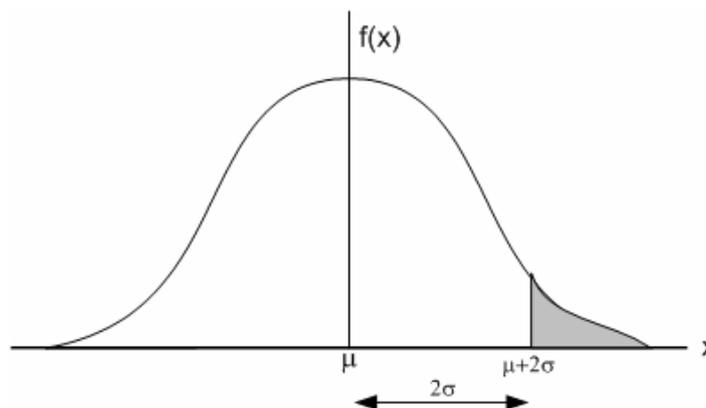


Figura 3.2. Áreas en función de " $\mu$ " en términos de la " $\sigma$ ".

Donde :

$Z$  : Variable normalizada y se calcula como se indica en la ecuación 14.

$$Z = \frac{(x - \mu)}{\sigma} \tag{14}$$

---

---

Donde :

$\mu$  : Valor medio teórico

$\sigma$  : Desviación estándar

La probabilidad de “x” se puede describir como en la ecuación 15.

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\alpha}^x e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (15)$$

La probabilidad de que la variable “x” tome un valor menor o igual a un número dado “ $x_a$ ” se escribe como la ecuación 16.

$$P\{x \leq x_a\} \quad (16)$$

Esta probabilidad es función de “ $x_a$ ” y se escribe como la ecuación 17.

$$P\{x \leq x_a\} = P\{x_a\} \quad (17)$$

$P\{x\}$  es llamada la función de distribución acumulativa de la variable “x” y la probabilidad de que tome un valor en el intervalo  $x_a < x < x_b$  se describe como la ecuación 18.

$$P\{x_a < x \leq x_b\} = P\{x_b\} - P\{x_a\} \quad (18)$$

tal que:

$$P\{x_a\} \leq P\{x_b\}, \quad \text{para, } x_a \leq x_b \quad (19)$$

De esta manera al incrementar los valores de “x”, la función de distribución continua nunca decrece en valor, por lo que:

$$P(\alpha) = 1 \quad (20)$$

La función de densidad acumulativa es continua y siempre posee una derivada continua [23], de esta forma se puede escribir la derivada que se indica en la ecuación 21.

$$\frac{dP\{x\}}{dx} = P\{x\} \quad (21)$$

Que es llamada función de distribución de “x”. Integrando la ecuación (21).

$$P\{x\} = \int_{-\alpha}^x p\{x\} dx \quad (22)$$

De acuerdo a la ecuación (20) tenemos que:

$$P\{x\} = \int_{-\alpha}^{\alpha} p\{x\} dx = 1 \quad (23)$$

De acuerdo a lo anterior  $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$  está determinada por la probabilidad de la variable “x”

en el intervalo  $-\infty < x < \infty$  como:

$$I = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\alpha}^{\alpha} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt = 1 \quad (24)$$

Haciendo que  $t^2=1$  y que  $Z = \frac{x-\mu}{\sigma}$ , tenemos que:

$$I = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\alpha}^{\alpha} e^{-\frac{Z^2}{2}} dZ \quad (25)$$

El valor de la probabilidad de “Z” se obtiene de la integral 25, que normalmente se desarrolla en términos de la serie de Mac Laurin, como se indica en la ecuación 26, [24].

$$P(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{Z^2}{2}} dz \quad (26)$$

Otra de las herramientas que se emplean en este tipo de estudios es la probabilidad acumulativa, que representa otra forma de dar los datos probabilísticos de la distribución normal.

---

---

### 3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

Las tensiones de flameo en los aislamientos externos son de naturaleza aleatoria, por lo que se establecen criterios probabilísticos basados en hipótesis para cada tipo de sobretensión. Estos métodos probabilísticos se aplican en el estudio de la probabilidad de flameo por contaminación, para esto se establece el concepto denominado *riesgo de falla*. El riesgo de falla está determinado en base a la información probabilística.

En forma teórica se puede establecer que si se aplica una tensión  $V_j$  a un aislamiento se puede producir flameo dentro de un rango de voltajes máximo y mínimo, expresado esto en forma probabilística como la ecuación 27.

$$\begin{aligned} P(V_j \leq V_{\min}) &= 0 \\ P(V_j \geq V_{\max}) &= 1 \end{aligned} \quad (27)$$

Donde la primera indica no flameo, en tanto la segunda indica la ocurrencia de flameo. La probabilidad de descarga dentro de un intervalo de tiempo, se puede determinar de la relación 28, [24].

$$P_j(V) = \frac{n_j}{N_j} \quad (28)$$

Donde :

$n_j$  : Número de flameos

$N_j$  : Número total de ensayos

### 3.5. MÉTODO PROBABILÍSTICO DE DISEÑO DE AISLAMIENTO POR CONTAMINACIÓN.

El método desarrollado para el cálculo de riesgo de falla por sobretensiones de maniobra de interruptores en el que se correlacionan las curvas de distribución probabilística de los sobrevoltajes aplicados y los sobrevoltajes resistentes, es aplicado con ciertas variantes para el cálculo de riesgo de falla en líneas de contaminación por contaminación.

---

---

En este método se deben de hacer ciertas consideraciones como [19]:

- La línea de transmisión debe de dividirse por secciones de igual nivel de contaminación.
- Cada sección se describe por las curvas de distribución probabilística de la DESD, con el objeto de determinar el valor más probable de contaminación y su valor.
- Se debe disponer de la información relacionada con la curva de tensión de aguante, para aisladores tipo, en función de la DESD.
- Los valores del  $V_{50\%}$  y de la  $\sigma$  son independientes de la longitud de la cadena de aisladores.

Lo anterior está basado en el hecho de la naturaleza estadística del fenómeno de flameo en aisladores contaminados y que se puede describir por la probabilidad de flameo, la cual se define como la relación del número de flameos y el total del número de ocurrencias a un nivel de contaminación dado a voltaje constante.

### 3.5.1. Evaluación de la Probabilidad de Falla.

La probabilidad de flameo de un aislador contaminado está en función del voltaje aplicado y del nivel de contaminación expresado en términos de la densidad equivalente de sal depositada. Como estas variables se representan mediante una función probabilística de tipo normal, permite determinar la probabilidad de flameo en función de estas de acuerdo a la ecuación 29, [19], [22], [25].

$$Pf(V_0, DESD) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{V_0} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{t-V(DES D)^2}{\sigma(DES D)}\right]^2} dt \quad (29)$$

Donde :

Pf : Probabilidad de flameo [%]

$V_0$  : Nivel de voltaje seleccionado

$V(DES D)$  : Voltaje de flameo en función de la DESD [kV]

$\sigma(DES D)$  : Desviación estándar en función de la DESD

t : Variable de integración

---

---

La expresión 29, es evaluada mediante un programa de computadora con el fin de obtener las curvas de distribución probabilística para distintos aisladores.

Otro de los aspectos a considerar en este estudio es:

- Se supone que se tienen varias unidades de aisladores en paralelo que simultáneamente están expuestas al mismo nivel de contaminación.
- El flameo de cada uno de los aisladores es independiente.

De lo anterior se puede decir que la probabilidad de que una cadena falle es mayor al considerar varias en paralelo. La probabilidad incrementada de “M” cadenas de aisladores en paralelo y a un mismo nivel de contaminación para la misma sección de línea se puede calcular como la ecuación 30, [15], [19].

$$Pfn = 1 - (1 - Pf)^M \quad (30)$$

Donde :

Pfn : Probabilidad de falla de M cadenas de aisladores en paralelo

M : Número de aisladores en paralelo

### 3.5.2. Cálculo de Riesgo de Falla.

La ocurrencia de que un aislador se contamina y al mismo tiempo flamee se le conoce como riesgo de falla (R). Que se puede calcular por la combinación de la curva probabilística de flameo (Pfn) con la curva de probabilidad de la DESD (pd (DESD)). Esto se calcula de acuerdo a la ecuación 31.

$$Dfn = pf * pd(DESD) \quad (31)$$

El cálculo está basado en la suma de todos los productos que forma el riesgo de falla. El valor de Dfn se conoce como la función de densidad de riesgo de falla y se puede evaluar para aisladores de distinto voltaje, usando las curvas de probabilidad de flameo de m cadenas de aisladores en paralelo.

Si la línea de transmisión se divide en “m” secciones de igual nivel de contaminación, el riesgo de falla se calcula para cada sección. Se presenta una falla en la línea cuando un aislador flamea en una de las secciones de la línea. El índice de falla esperado de la línea se calcula con la ecuación 32.

$$RF = 1 - \sum_{i=1}^m (1 - RF_i) \quad (32)$$

Donde :

RF : Índice de riesgo de falla de la línea [%]

RF<sub>i</sub> : Riesgo de falla de la "i - ésima" sección con el mismo nivel de contaminación

i : Número de secciones de la línea

Si se supone que para cada sección de la línea el riesgo de falla de cada una de las secciones es igual el riesgo de falla se puede evaluar como lo indica la ecuación 33, [21].

$$RF = mRF_i \quad (33)$$

Es decir el riesgo de falla de la línea es superior a cualquiera de las secciones de la misma línea.

### **3.6. PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA EVALUAR LA PROBABILIDAD DE FALLA.**

Se parte del cálculo de la tensión crítica de flameo, así como de su desviación estándar, para lo cual se aplican las ecuaciones 9 y 10 (ver capítulo II). De los valores que se obtienen con dichas expresiones se obtiene la variable normalizada “Z” que está dada como la ecuación 34, [22], [26].

$$Z = \frac{V_i - V_{50\%}(DESD)}{\sigma(DESD)} \quad (34)$$

Donde :

V<sub>i</sub> : Voltajes aplicados

V<sub>50%</sub>(DESD) : Voltaje de flameo en función de la DESD [kV]

σ(DESD) : Desviación estándar en función de la DESD

---

---

Con esto se puede evaluar la probabilidad de falla como la ecuación 35, [19], [22], [26].

$$Pf = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{1}{2}Z^2} dZ \quad (35)$$

Donde :

Pf : Probabilidad de falla de una cadena de aisladores[%]

Estos valores son ajustados a un polinomio de octavo grado por un programa de ajuste de mínimos cuadrados, para poder graficar la probabilidad de flameo.

Si se conoce la probabilidad de falla para una cadena de aisladores se podrá calcular la probabilidad de falla para “n” cadenas de aisladores en paralelo, lo cual se puede hacer aplicando la expresión 30.

$$Pfn = 1 - (1 - Pf)^M$$

El programa de cómputo desarrollado para evaluar la probabilidad de falla se puede resumir en la figura 3.3, que describe de forma general, los pasos a seguir para determinar el riesgo de falla de “n” cadenas de aisladores de una línea de transmisión afectados por la severidad de la contaminación.

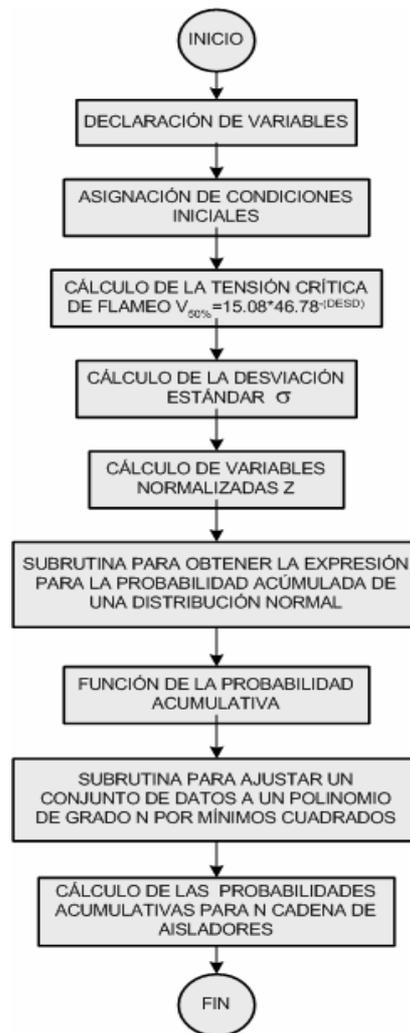


Figura 3.3. Diagrama de bloques para el cálculo de la probabilidad de falla acumulativa de aisladores en paralelo.

### 3.7. RESULTADOS DEL CÁLCULO DEL RIESGO DE FALLA PARA AISLADORES EN PARALELO.

Con la finalidad de poder entender el comportamiento de los aisladores contaminados es necesario hacer uso del programa computacional descrito anteriormente, y poder simular distintas condiciones de operación, las cuales se describen en las siguientes secciones.

Los parámetros a estudiar son la probabilidad de falla para cadenas de aisladores en paralelo que se encuentran localizadas en una sección de la línea que presenta el mismo nivel de contaminación, así como el riesgo de falla de las mismas.

---

### 3.7.1. Efecto del Número de Cadenas de Aisladores.

Como se mencionó anteriormente, es necesario dividir la línea de transmisión bajo estudio en secciones que comprenden el mismo nivel de contaminación. Cada sección puede tener distancias diferentes y por lo tanto tener un número distinto de aisladores en cada una de las secciones.

Aunado a la posibilidad de tener diferente número de cadenas de aisladores en cada sección está la posibilidad de tener diferente nivel de contaminación entre las secciones, por lo que este es otro factor que afecta el comportamiento de los aisladores contaminados.

En las figuras 3.4 y 3.5, se muestra el comportamiento de distinto número de cadenas de aisladores en paralelo que se encuentran en una sección de la línea bajo un mismo nivel de contaminación.

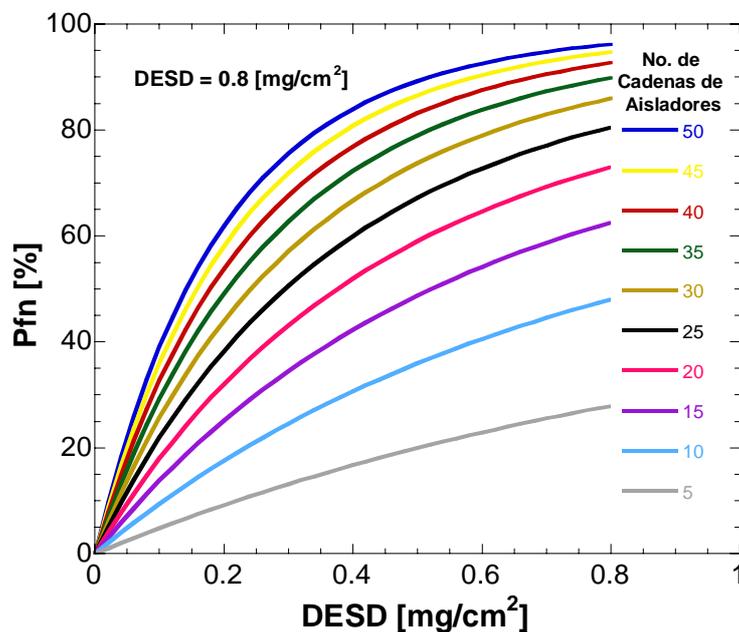


Figura 3.4. Probabilidad de falla acumulativa para “n” cadenas de aisladores con una DESD =  $0.8 \text{ mg/cm}^2$ .

En la figura 3.4, se muestra el comportamiento de diferente número de cadenas de aisladores localizadas en una zona que alcanza un nivel de contaminación muy alto ( $0.8 \text{ mg/cm}^2$ ).

---

De esta figura podemos notar que entre mayor sea el número de cadenas localizadas dentro de una misma sección de la línea (seccionada anteriormente) mayor será la probabilidad de falla que presente dicha región. Ya que un número mayor de aisladores están sometidos a un nivel de contaminación y la probabilidad de falla de cada uno de los aisladores, aumenta la probabilidad acumulada de falla de la sección entre mayor sea el número de cadenas de aisladores.

En la figura 3.5, se muestra la probabilidad de falla acumulada que presentan distintos números de cadenas de aisladores bajo un nivel de contaminación de  $0.6 \text{ mg/cm}^2$ .

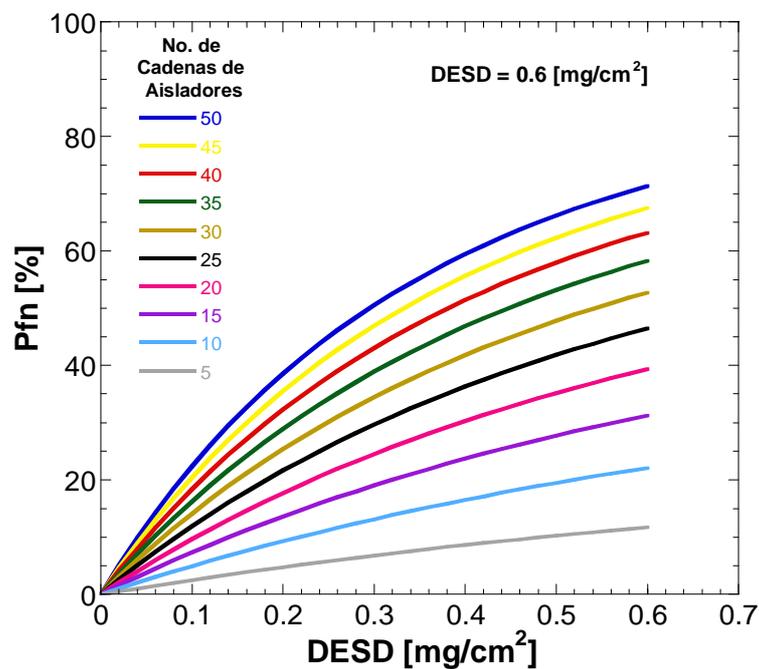


Figura 3.5. Probabilidad de falla acumulada para “n” cadenas de aisladores con una DESD =  $0.6 \text{ mg/cm}^2$ .

Como se puede observar, el comportamiento de los aisladores es similar a la figura 3.4, por lo que se sigue observando que a mayor número de cadenas, mayor es la probabilidad de falla independientemente del nivel de contaminación.

---

### 3.7.2. Efecto del Nivel de Contaminación.

Para poder observar con mayor claridad el efecto que tienen las variaciones del nivel de contaminación sobre un número determinado de cadenas de aisladores instalados en cierta región, se presenta a continuación la probabilidad acumulativa de falla de cierto número de cadenas de aisladores bajo diferentes condiciones de contaminación. Lo anterior se describe en la figura 3.6.

De la figura 3.6, se puede observar como crece la probabilidad de falla según se incrementa el nivel de contaminación.

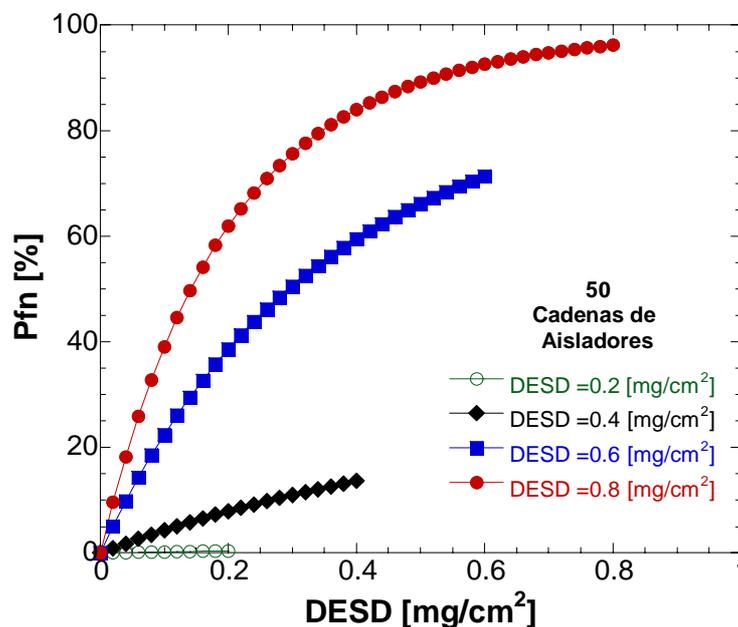


Figura 3.6. Probabilidad de falla acumulativa para 50 cadenas de aisladores bajo diferentes condiciones de DESD.

Estas variaciones de contaminación se pueden presentar debido a los distintos tipos de contaminación que se pueden presentar como se han mencionado anteriormente (marina, rural, industrial). Los niveles alcanzados de contaminación se deben a la actividad económica del lugar o a su localización geográfica de la misma.

Otra causa que puede hacer cambiar los valores de probabilidad de falla para un cierto número de cadenas de aisladores que se encuentran en una zona con un determinado nivel de contaminación, es la forma en que se alcanza este valor máximo de contaminación.

La rapidez de acumulación del contaminante durante un cierto periodo de tiempo se puede presentar de diferentes maneras, de forma paulatina, de tal forma que la variación del nivel de contaminación se va dando por valores pequeños de contaminación. Por otra parte dichos cambios se pueden dar de manera más rápida. Para poder entender este concepto en la figura 3.7, se describe dicho comportamiento.

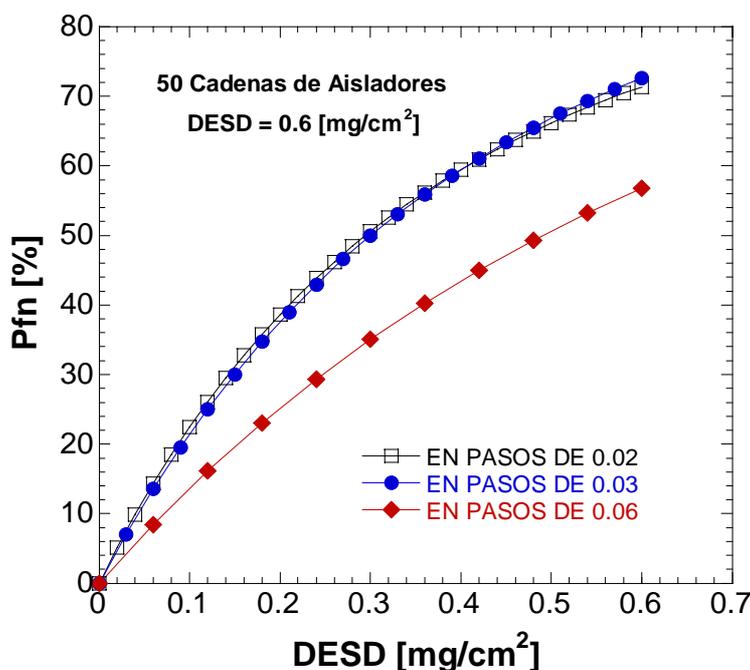


Figura 3.7. Probabilidad de falla acumulativa para 50 cadenas de aisladores para una DESD igual a 0.6 mg/cm<sup>2</sup>. Obtenido con diferente rapidez.

Para las condiciones mostradas en la figura 3.7, se puede decir que, si la obtención de un cierto nivel de contaminación se da de forma más paulatina la probabilidad de falla de “n” cadenas de aisladores es mayor que, si la acumulación del contaminante se da de forma más repentina. Esto tiene que ver con el tiempo de exposición que tienen los aisladores a la contaminación, si el tiempo de acumulación del contaminante es mayor la probabilidad de falla aumenta.

### 3.7.3. Riesgo de Falla.

El estudio de la probabilidad de falla para n cadenas de aisladores bajo diferentes condiciones de contaminación, nos lleva a estimar el riesgo de falla de los aislamientos en paralelo de una misma región caracterizada por un nivel de contaminación dado.

Para esto se presenta la figura 3.8, que describe para diferentes números de cadenas de aisladores el riesgo de falla que presentan bajo diferentes niveles de contaminación.

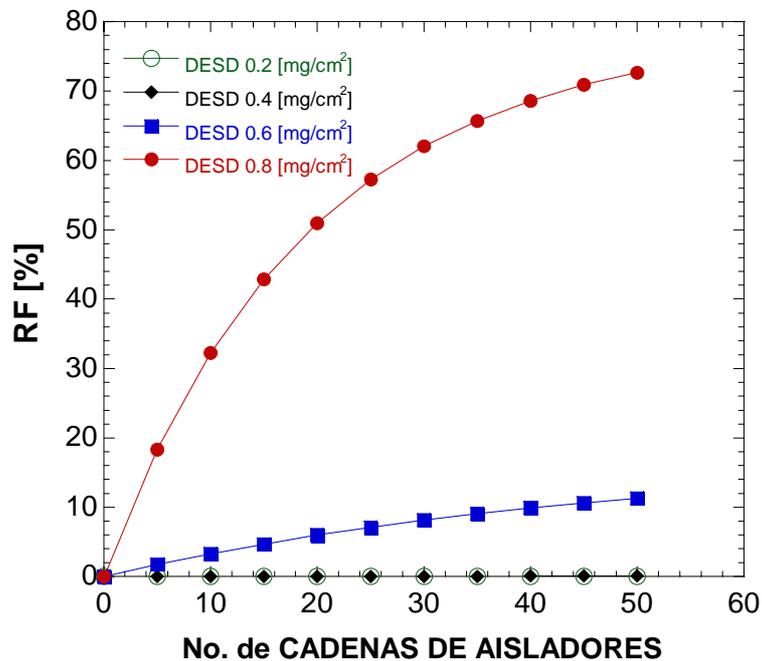


Figura 3.8. Riesgo de falla para “n” cadenas de aisladores para distintos niveles de contaminación.

En la figura 3.8, se puede observar que se cuenta con un riesgo de falla mayor bajo dos condiciones:

- Cuando aumenta el nivel de contaminación
- Cuando aumenta el número de cadenas de aisladores

Esta última es más representativa cuando el nivel de contaminación es alto. Esto se puede ver en la gráfica 3.8, correspondientes a niveles de contaminación de 0.2 y 0.4 mg/cm<sup>2</sup>, que tiende a variar muy poco el riesgo de falla según cambia el número de aisladores. Por otro lado el efecto del número de aisladores en el riesgo de falla es más notable para los niveles de contaminación correspondientes a 0.6 y 0.8 mg/cm<sup>2</sup>.

En la figura anterior se mostró como las variaciones del nivel de contaminación para un mismo número de cadenas de aisladores afecta al riesgo de falla, al igual que el número de cadenas para un mismo nivel de contaminación.

Otro factor como ya se había mencionado es la forma en que se acumula el contaminante hasta alcanzar un valor determinado. Para ver el efecto de esto sobre el riesgo de falla, se evalúa el riesgo de falla para “n” cadenas de aisladores que están bajo un mismo nivel de contaminación pero que es alcanzado dicho valor en pasos diferentes, es decir de forma más paulatina o más rápida según sea el caso. Lo anterior se describe en la figura 3.9.

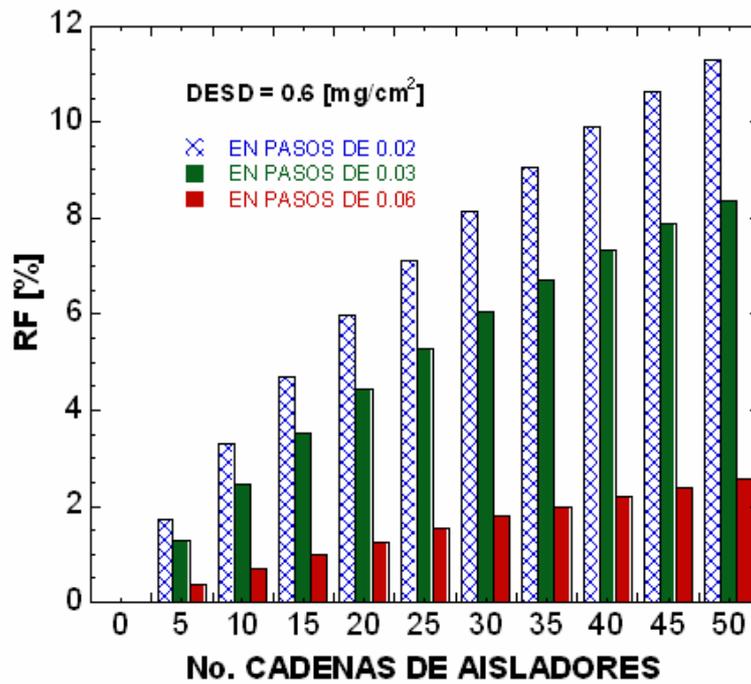


Figura 3.9. Riesgo de falla para “n” cadenas de aisladores a un valor de DESD de 0.6 mg/cm<sup>2</sup>. Obtenido con diferente rapidez.

Como se había visto con la probabilidad de falla, de forma similar el riesgo de falla es mayor para un número determinado de cadenas de aisladores si el nivel de contaminación especificado del lugar se obtiene de forma más paulatina (pasos pequeños), esto se debe también a que el aislador está expuesto a la contaminación por un tiempo mayor y existe la posibilidad de que una falla se presente cuando el contaminante se expone a la contaminación durante más tiempo.

De los resultados anteriores es necesario analizar que factor afecta más severamente la probabilidad de falla de la sección de la línea, entre estos factores debemos de tomar en cuenta el cambio del número de aisladores y el cambio del nivel de contaminación. Para esto es necesario hacer un ajuste lineal a las curvas de probabilidad y determinar su rapidez de cambio en cada caso. Lo anterior se puede resumir en las tablas 3.1, 3.2.

Tabla 3.1. Rapidez de cambio de la probabilidad de falla respecto al cambio del nivel de contaminación.

No. De Aisladores	DESD [mg/cm <sup>2</sup> ]	Rapidez de Cambio de Probabilidad
50	0.8	0.3391000
50	0.6	0.1161100
50	0.4	0.0075004
50	0.2	0.0001076

Tabla 3.2. Rapidez de cambio de la probabilidad de falla respecto al cambio del número de aisladores.

No. De Aisladores	DESD [mg/cm <sup>2</sup> ]	Rapidez de Cambio de Probabilidad
50	0.8	0.339100
45	0.8	0.306960
40	0.8	0.272810
35	0.8	0.236780
30	0.8	0.199160
25	0.8	0.160450
20	0.8	0.121500
15	0.8	0.083579
10	0.8	0.048606
5	0.8	0.019393

De la tabla 3.2, se puede observar que si el número de aisladores disminuye, la rapidez de cambio de la probabilidad de falla disminuye gradualmente, sin presentar cambios bruscos de la pendiente. En la tabla 3.1, los cambios de la rapidez de cambio son más notables si disminuye el nivel de contaminación. Por lo que podemos decir que la probabilidad de falla de una sección de una línea de transmisión, es más sensible a los cambios del nivel de contaminación que al cambio del número de aisladores instalados en dicha sección. De forma general se puede mencionar que el riesgo de falla por contaminación de una línea de transmisión se ve afectado por:

- El nivel de contaminación (expresado como la DESD) que presente una sección de la línea.
- El número de cadenas de aisladores instaladas en dicha sección de la línea.
- La rapidez de acumulación del contaminante sobre la superficie del aislador.

---

---

El riesgo de falla es alto si el nivel de contaminación es alto ( $0.8 - 0.6 \text{ mg/cm}^2$ ), aunque se ve afectado si:

- El número de cadenas de aisladores instaladas en la sección crece.
- La acumulación del contaminante se da de forma paulatina.

#### **3.7.4. Efecto de la configuración de la Cadena de Aisladores.**

Para aisladores tipo estándar en configuración “I” la tensión crítica de flameo en función de la densidad equivalente de sal depositada está dada por la ecuación 36, [27].

$$V_{50\%} = 64.4 + \frac{1.96}{DESD} \quad (36)$$

Para una configuración “V”, la tensión crítica de flameo está dada por la ecuación 37.

$$V_{50\%} = 87.6 + \frac{1.96}{DESD} \quad (37)$$

Con las ecuaciones 36 y 37, se puede graficar la tensión crítica de flameo en función de la DESD, para diferentes configuraciones de aisladores, lo anterior se muestra en la figura 3.10, donde se observa que para una configuración “I” la tensión crítica de flameo es menor que para la configuración “V”. Lo anterior se debe a que un aislador en posición “I” se contamina más que un aislador en posición “V”.

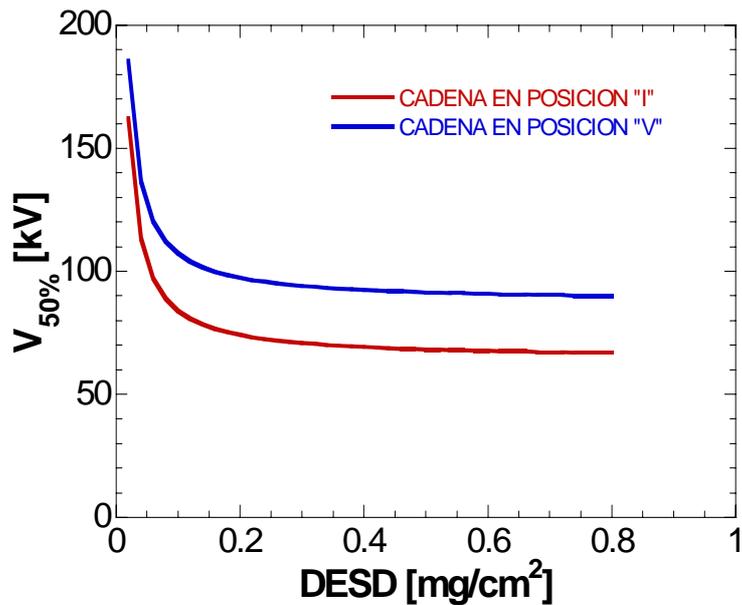


Figura 3.10. Tensión crítica de flameo en función de la DESD para configuración “I”, “V”.

La probabilidad de falla acumulativa para distintos niveles de contaminación y diferente número de cadenas de aisladores en paralelo, para una configuración “I”, se muestra en las figuras 3.11, 3.12, 3.13, 3.14.

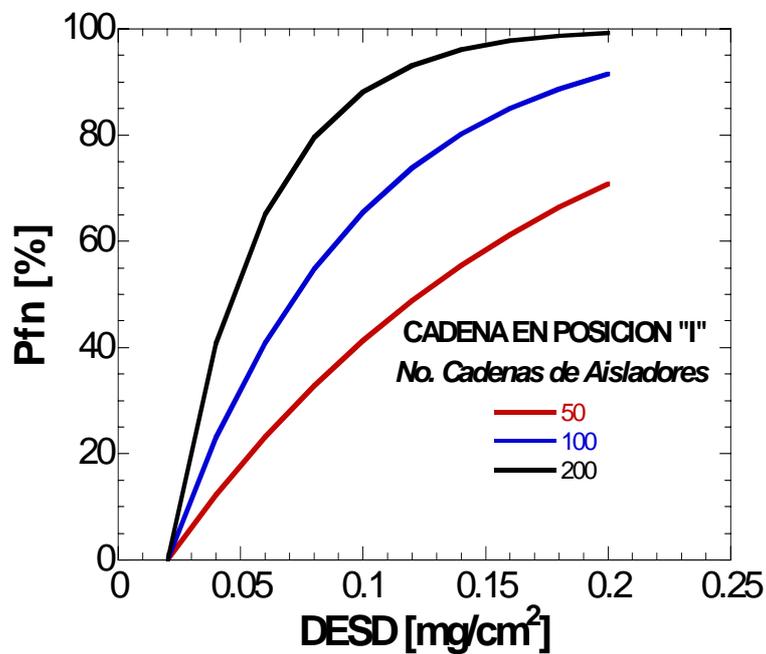


Figura 3.11. Probabilidad de falla acumulativa para una DESD = 0.2 mg/cm<sup>2</sup> Para una configuración “I”.

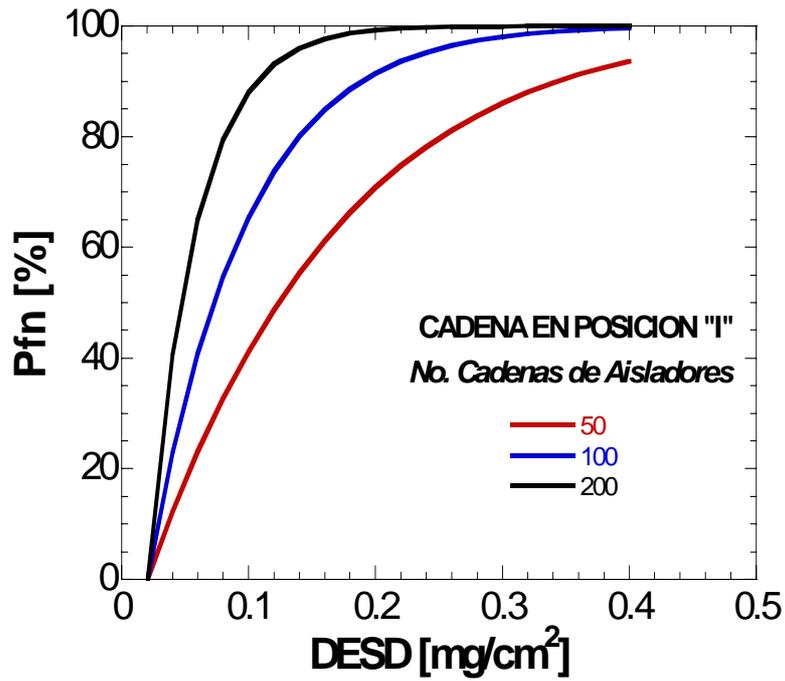


Figura 3.12. Probabilidad de falla acumulativa para una DESD = 0.4 mg/cm<sup>2</sup> para configuración "I".

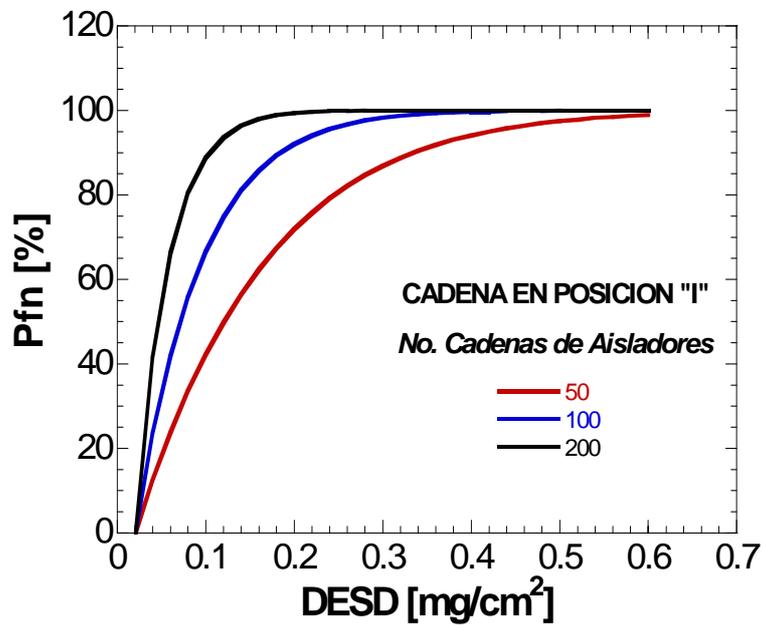


Figura 3.13. Probabilidad de falla acumulativa para una DESD = 0.6 mg/cm<sup>2</sup> para configuración "I".

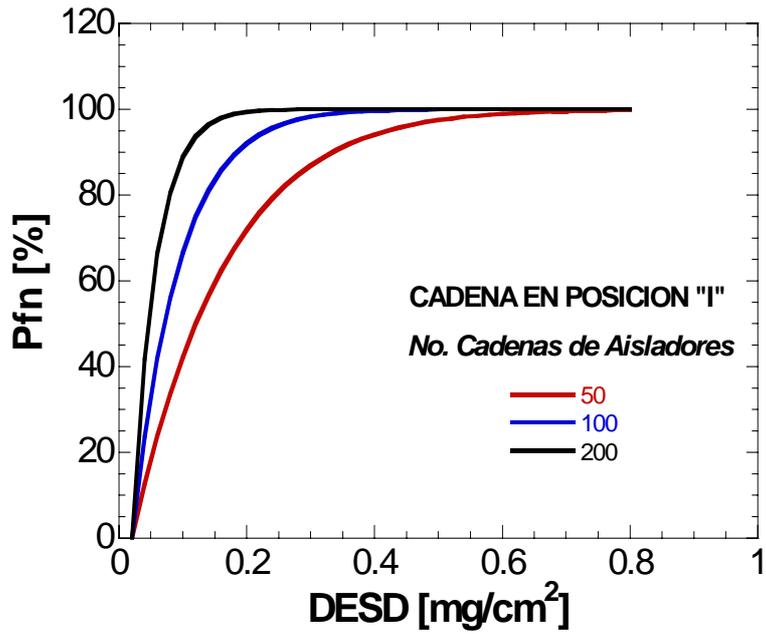


Figura 3.14. Probabilidad de falla acumulativa para una DESD = 0.8 mg/cm<sup>2</sup> para configuración "I".

Para una configuración de aisladores en posición "V", se determina la probabilidad de falla acumulativa para diferente número de cadenas de aisladores y diferentes niveles de contaminación, los cuales se muestran a continuación en las figuras 3.15, 3.16, 3.17, 3.18.

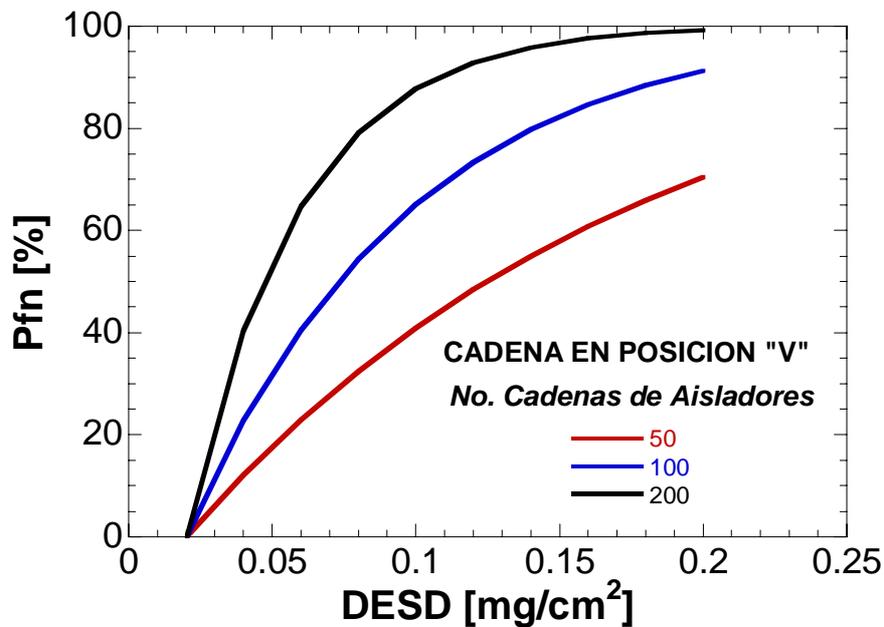


FIGURA 3.15. Probabilidad de falla acumulativa para una DESD = 0.2 mg/cm<sup>2</sup> para una configuración "V".

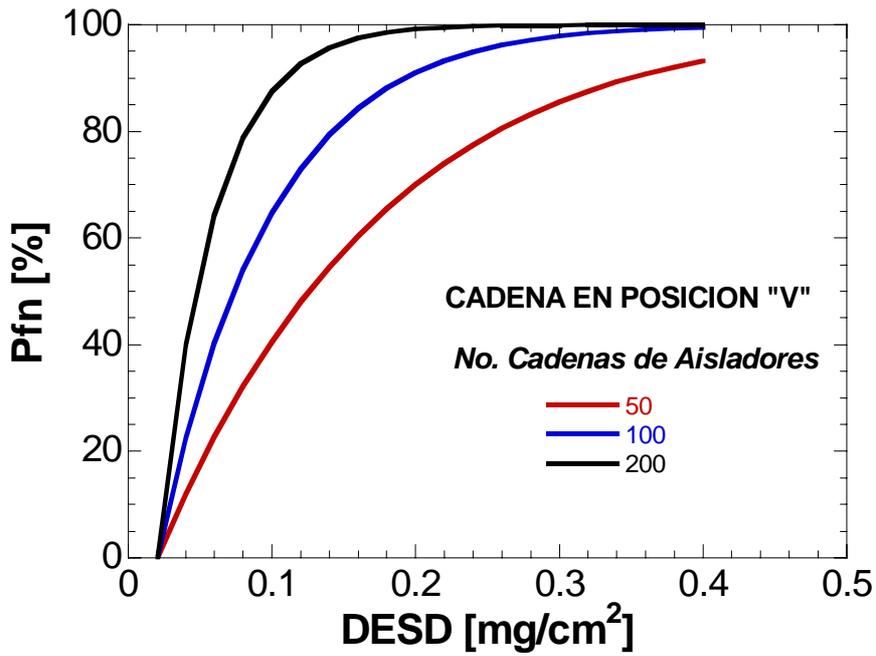


FIGURA 3.16. Probabilidad de falla acumulativa para una DESD = 0.4 mg/cm<sup>2</sup> para una configuración "V".

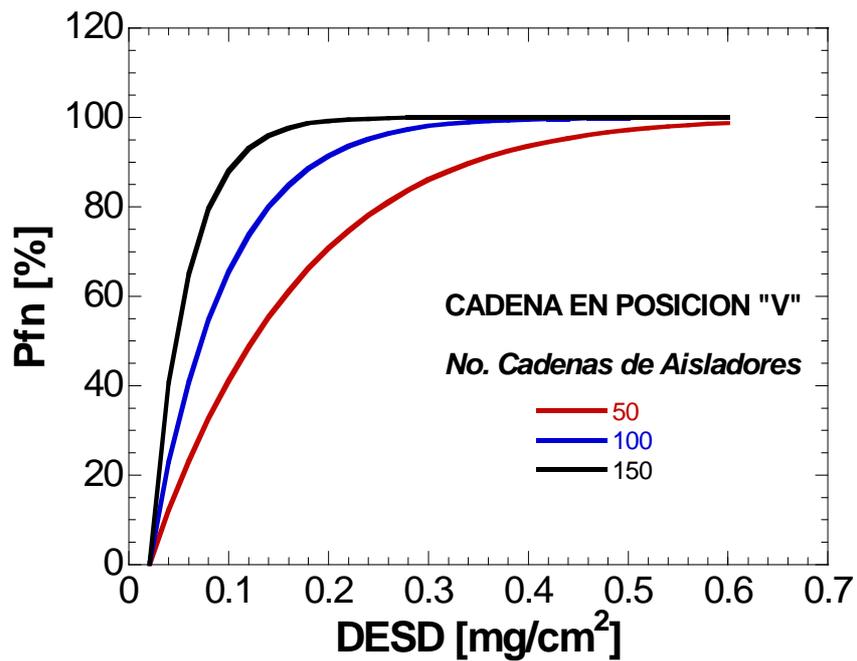


FIGURA 3.17. Probabilidad de falla acumulativa para una DESD = 0.6 mg/cm<sup>2</sup> para una configuración "V".

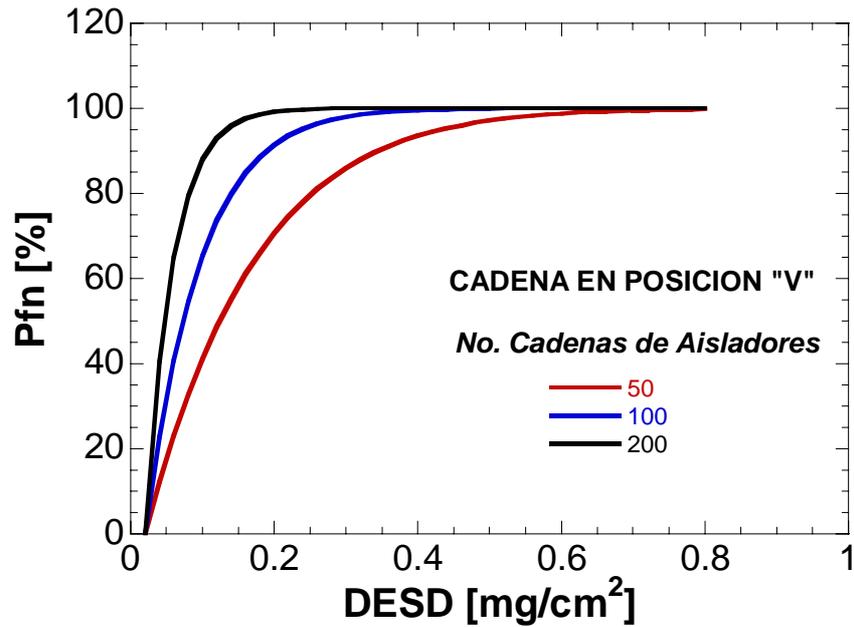


FIGURA 3.18. Probabilidad de falla acumulativa para una DESD = 0.8 mg/cm<sup>2</sup> para una configuración “V”.

### 3.7.4. Índice de Salidas.

Para determinar el índice de salidas en un tramo de línea que tiene un nivel de contaminación dado, considerando diferente número de cadenas de aisladores en paralelo de la línea, está dado por la expresión 36.

$$N_0 \text{ de fallas} = \frac{P_{fn}}{N_0 \text{ de eventos}} \times 100 \quad (36)$$

A continuación se muestra el índice de salidas, para diferentes niveles de contaminación, para diferente número de cadenas de aisladores, considerando un claro entre torres de 400 m. La distancia que existe entre las torres influye en el número de cadenas de aisladores que se localizaran en un cierto tramo de línea, es decir, si la distancia entre torres es menor, existirá un mayor número de cadenas de aisladores para una longitud de línea “λ” que si la distancia entre torres es mayor para la misma longitud de línea “λ”. De la figura 3.19 a la 3.26, se muestran los resultados del índice de salidas.

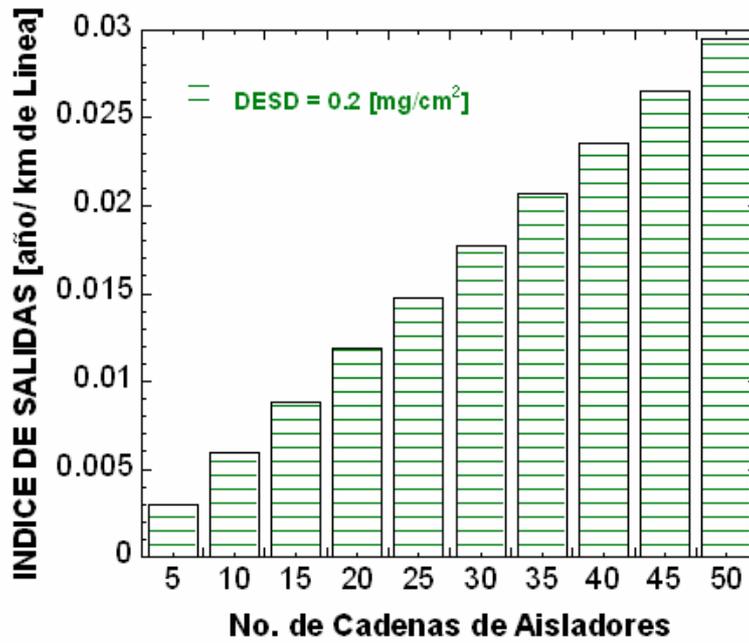


Figura 3.19. Índice de salidas, para “n” cadenas de aisladores, con una DESD = 0.2 mg/cm<sup>2</sup>.

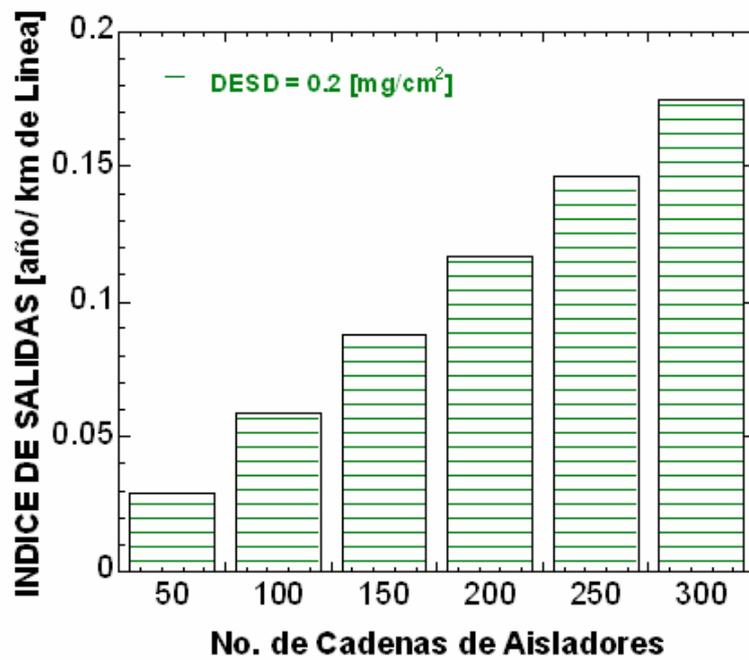


Figura 3.20. Índice de salidas, para “n” cadenas de aisladores, con una DESD = 0.2 mg/cm<sup>2</sup>.

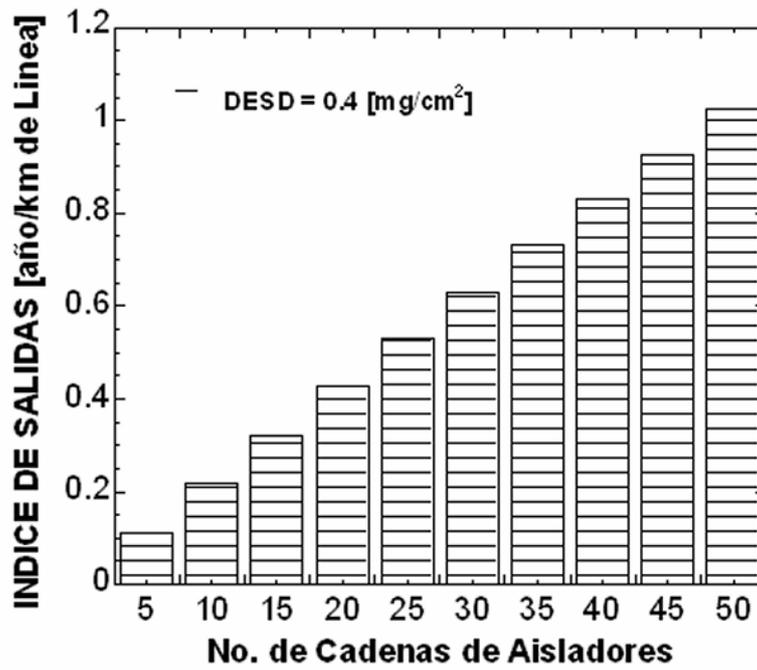


Figura 3.21. Índice de salidas, para “n” cadenas de aisladores, con una DESD = 0.4 mg/cm<sup>2</sup>.

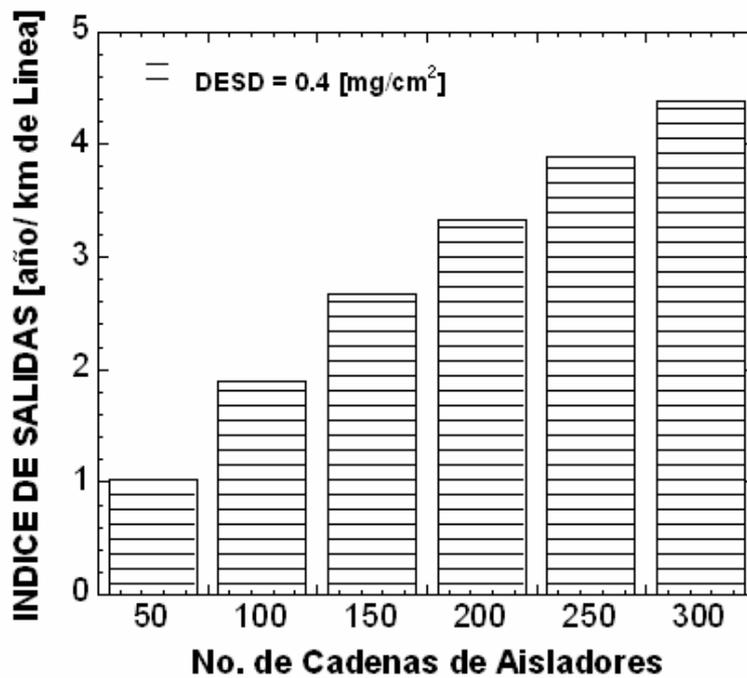


Figura 3.22. Índice de salidas, para “n” cadenas de aisladores, con una DESD = 0.4 mg/cm<sup>2</sup>.

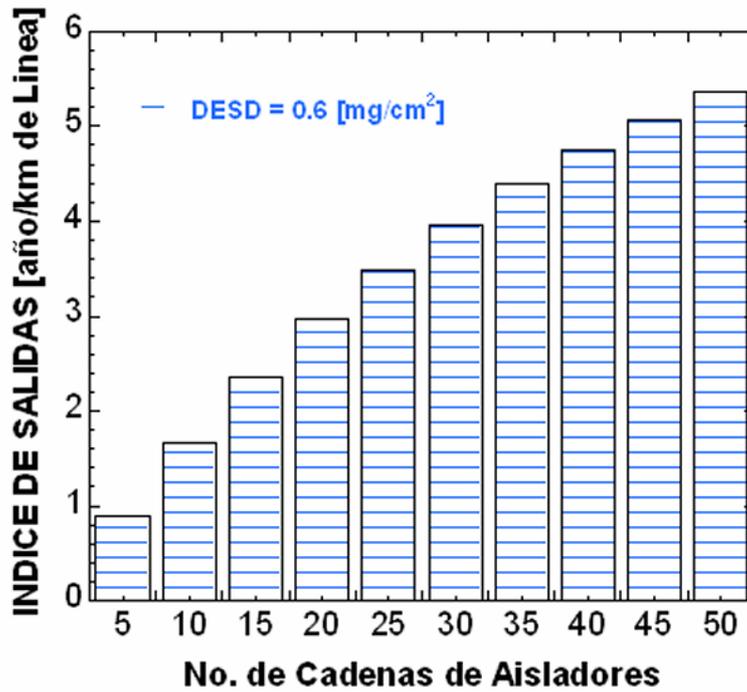


Figura 3.23. Índice de salidas, para “n” cadenas de aisladores, con una DESD = 0.6 mg/cm<sup>2</sup>.

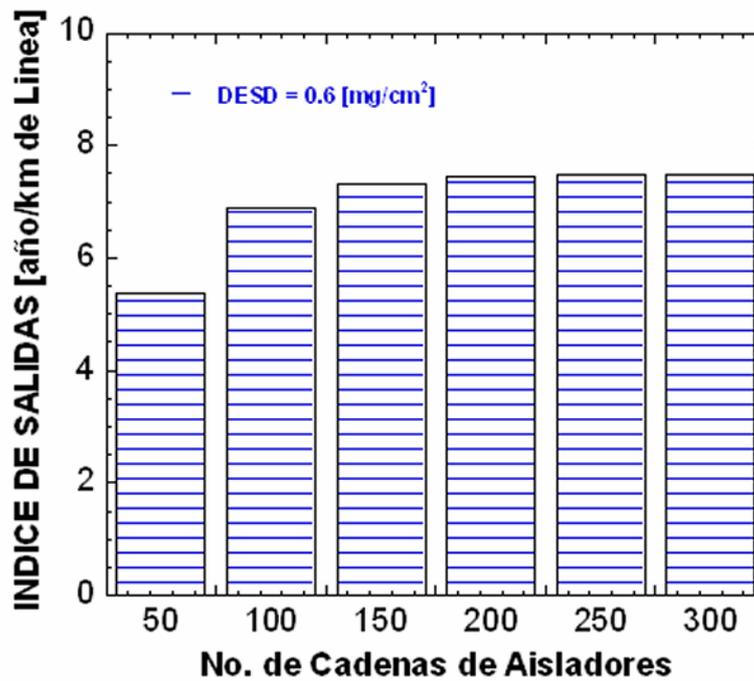


Figura 3.24. Índice de salidas, para “n” cadenas de aisladores, con una DESD = 0.6 mg/cm<sup>2</sup>.

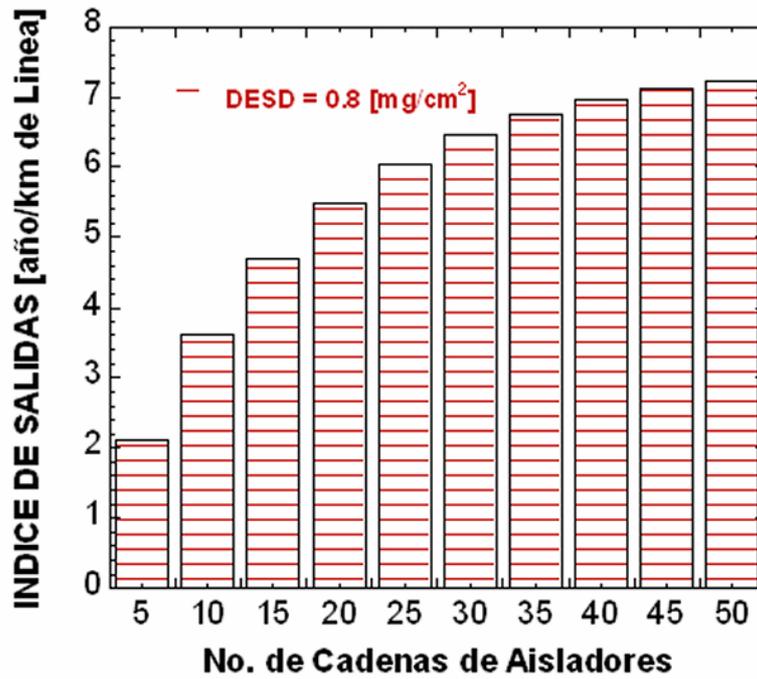


Figura 3.25. Índice de salidas, para “n” cadenas de aisladores, con una DESD = 0.8 mg/cm<sup>2</sup>.

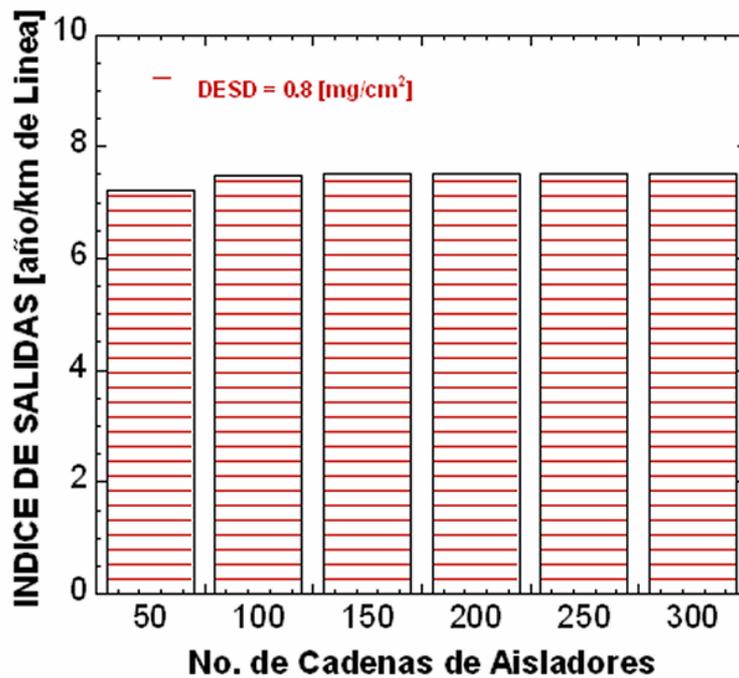


Figura 3.26. Índice de salidas, para “n” cadenas de aisladores, con una DESD = 0.8 mg/cm<sup>2</sup>.

---

---

De las figuras 3.19 a la 3.26, se puede observar, que dado un cierto nivel de contaminación, conforme aumenta el número de aisladores contaminados aumenta el índice de salidas del tramo de la línea correspondiente al número de aisladores, lo anterior se debe a que con un número mayor de cadenas de aisladores contaminados en un tramo de línea bajo un mismo nivel de contaminación, se aumenta la probabilidad de falla. También se puede observar que, el índice de salidas por contaminación depende de la longitud del tramo de la línea que se desea analizar.

Se puede decir que el índice de salidas está en función de la longitud de la línea considerada y por tanto del número de cadenas de aisladores contenidas en dicho tramo, así como del nivel de contaminación.

### **3.7.5. Distancia de Fuga.**

Como se ha mencionado anteriormente la distancia de fuga de una cadena de aisladores es la distancia mínima requerida para soportar los esfuerzos dieléctricos a que se somete una instalación. La contaminación ambiental tiene un efecto directo sobre la distancia de fuga de la cadena. Para analizar el efecto del nivel de contaminación sobre los aislamientos eléctricos bajo diferentes tensiones de operación (115, 230 y 400 kV) de las líneas de transmisión, se tomará como referencia los niveles de contaminación expresados en la tabla 2.5, donde se correlaciona la distancia de fuga mínima nominal con diferentes niveles de contaminación.

El estudio de la distancia de fuga lleva a determinar el número de aisladores que requiere una cadena de aisladores, empleando distintos tipos de aisladores para que operen bajo diferentes condiciones de contaminación. En este caso se emplea para el estudio tres diferentes tipos de aisladores que se emplean en las líneas de transmisión de la CFE, los cuales se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Tipo de aislador y su distancia de fuga.

<b>Tipo de Aislador</b>	<b>Distancia de Fuga de Catálogo [mm]</b>
27SVC111	292
28SV111C	445
32SPC111	612

Para una tensión de 400 kV y empleando los tipos de aisladores mencionados anteriormente se determinó el número de aisladores necesarios para diferentes niveles de contaminación. Lo anterior se muestra en la figura 3.27.

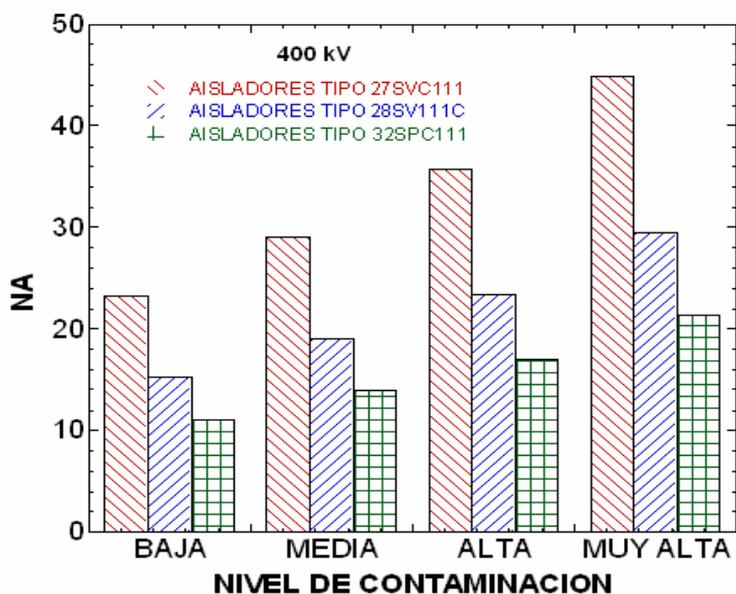


Figura 3.27. Número de aisladores a diferentes niveles de contaminación a una tensión nominal de 400 kV y diferente tipo de aislador.

En la figura 3.27, se observa que al aumentar el nivel de contaminación se requiere de un número mayor de aisladores. También es de observar que según el tipo de aislador del que se trate se requiere más o menos cantidad de ellos para un nivel determinado de contaminación, esto se debe a que cada uno de ellos tiene una distancia de fuga diferente, la cual es dada por el fabricante y se caracteriza según la silueta del aislador.

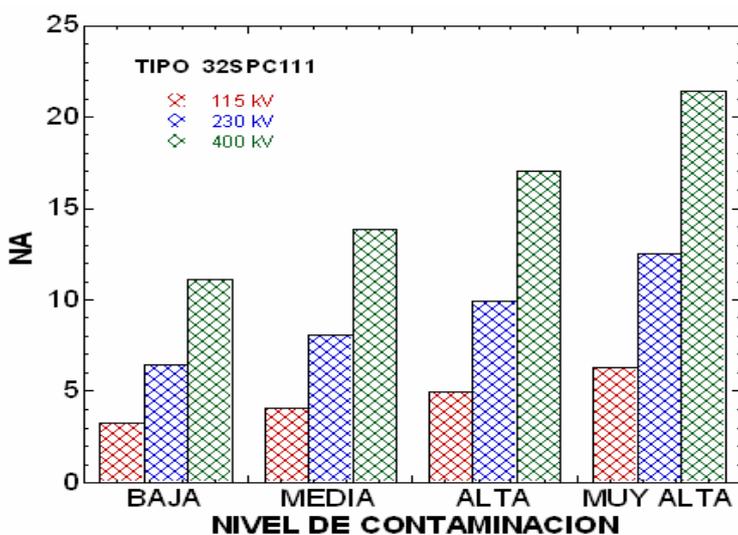


Figura 3.28. Número de aisladores a diferentes niveles de contaminación y diferente tensión nominal, con un mismo tipo de aislador.

La figura 3.28, muestra como aumenta el número de aisladores requerido según aumenta la tensión nominal del sistema. El nivel de tensión al cual opera el aislador sujeto a la contaminación ambiental, también influye sobre el número de aisladores que se requiere para un mismo tipo de aislador.

En forma general podemos decir que el número requerido de aisladores depende de:

- El tipo de aislador
- El nivel de contaminación
- La tensión nominal del sistema

Cuando se realiza el cálculo del número de aisladores que se tendrán que instalar en una cadena de aisladores, tanto la tensión nominal como el nivel de contaminación son magnitudes que se conocen según la línea de transmisión de la que se trate y la zona en la que se encuentre, por lo que la selección del *tipo de aislador* definirá la cantidad de éstos que se requiere para las condiciones de contaminación que presenta la línea a la cual se desea estudiar. En la tabla 3.4, se presentan los aisladores requeridos para un cierto nivel de contaminación y tensión nominal de acuerdo a los tres tipos de aisladores presentados redondeando las cantidades obtenidas.

Tabla 3.4. Número de aisladores por nivel de contaminación.

Tipo de Aislador	Nivel de Contaminación	Tensión Nominal [kV]		
		115	230	400
27SVC111	<i>Baja</i>	7	14	23
	<i>Media</i>	9	17	29
	<i>Alta</i>	11	21	36
	<i>Muy Alta</i>	13	26	45
28SV111C	<i>Baja</i>	5	9	15
	<i>Media</i>	6	11	19
	<i>Alta</i>	7	14	24
	<i>Muy Alta</i>	9	17	30
32SPC111	<i>Baja</i>	3	7	11
	<i>Media</i>	4	8	14
	<i>Alta</i>	5	10	17
	<i>Muy Alta</i>	6	13	21

---

---

### 3.8. EFECTO DE LA HUMEDAD AMBIENTAL SOBRE LA TENSIÓN CRÍTICA DE FLAMEO.

Como se ha mencionado anteriormente las condiciones ambientales tienen influencia sobre el comportamiento dieléctrico de los aisladores expuestos al medio ambiente. Además de la contaminación que se presenta sobre la superficie de los aisladores, expresada como la densidad equivalente de sal depositada, la humedad juega un papel importante en el comportamiento de la tensión crítica de flameo que presenta un aislador contaminado.

La humectación del contaminante ya depositado sobre la superficie del aislador promueve la formación de bandas secas, de donde se inicia el proceso de flameo de un aislamiento contaminado.

El grado de humectación del contaminante en la superficie del aislador va a estar dado por el tipo de contaminante y por la humedad relativa del medio ambiente. En el caso del tipo de contaminante, como se ha manejado anteriormente, se considera que es NaCl la cual debe presentar una densidad de absorción de humedad la cual se puede aproximar mediante la relación 37, [28].

$$m = \frac{\tan^{-1}(t/10)}{\pi/2} m_0 \quad (37)$$

Donde :

m : Densidad de absorción de humedad [ $\text{mg}/\text{cm}^2$ ]

t : Tiempo de exposición [seg]

$m_0$  : Densidad de absorción saturada de humedad

La densidad de absorción saturada de humedad está en función de la humedad relativa y del nivel de contaminación, la cual se puede aproximar mediante la ecuación 38, [28].

$$m_0 = \frac{\tan((RH - 75) \times 5 - 62.5) + \tan(62.5)}{2 \times \tan(62.5)} \times DESD \times 10 \quad (38)$$

Donde :

RH : Humedad relativa [%]

DESD : Densidad equivalente de sal depositada [ $\text{mg}/\text{cm}^2$ ]

---

Para observar el efecto que tiene el nivel de contaminación sobre la densidad de absorción de humedad se presenta en la figura siguiente, para una humedad relativa constante del 90% la variación de la densidad de absorción de humedad para diferentes niveles de contaminación, desde un nivel ligero hasta un nivel alto de contaminación.

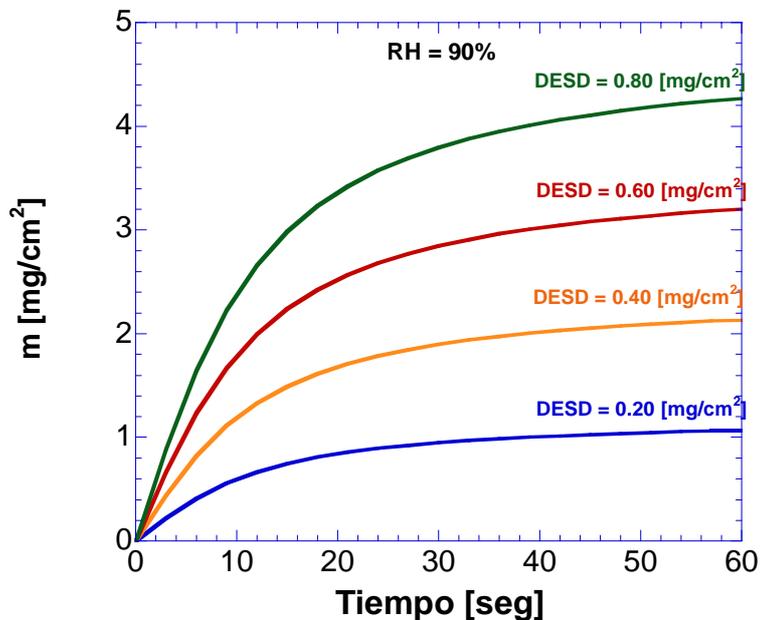


Figura 3.29. Densidad de absorción de humedad para diferentes niveles de contaminación y RH constante.

De la figura 3.29, se puede observar que a mayor nivel de contaminación la densidad de absorción de humedad aumenta, esto se debe a que el número de partículas de contaminante depositadas en la superficie del aislador aumenta, por lo que incrementa su capacidad de retener humedad en dichas partículas.

En la figura 3.30, se muestra como varía la densidad de absorción de humedad respecto a la variación de la humedad relativa del ambiente.

Como se observa, la densidad de absorción aumenta cuando aumenta la humedad relativa para un mismo nivel de contaminación, ya que las partículas adquieren mayor humectación conforme la humedad del ambiente crece.

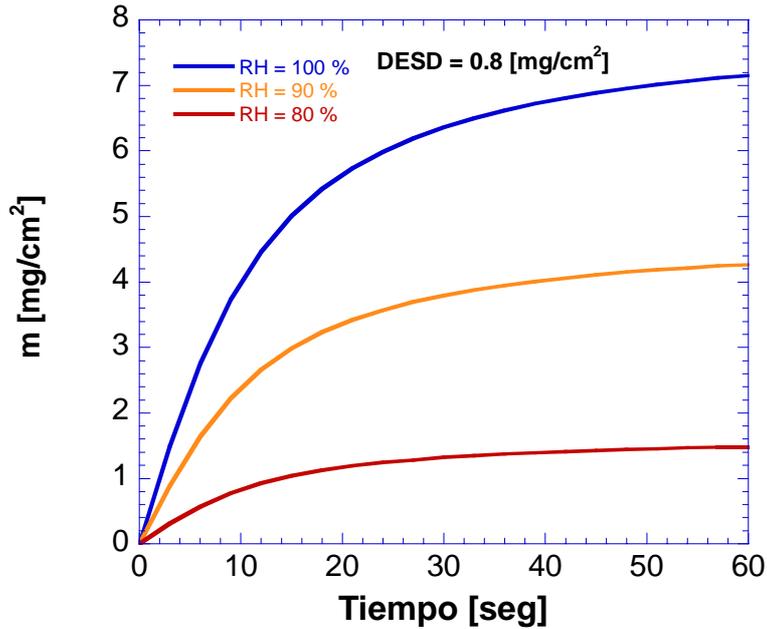


Figura 3.30. Densidad de absorción de humedad para diferentes niveles de humedad relativa y nivel de contaminación constante.

Para poder representar el efecto de la humedad sobre la tensión crítica de flameo, se ha desarrollado un modelo matemático, que está en función de la humedad, así como del nivel de contaminación. La relación entre la humedad y la tensión crítica de flameo está dada por la siguiente relación 39, [15], [28], [29].

$$V_{50\%} = kh \left[ 1 - \frac{1}{1 + \exp\{-(w - 75)\}} \right] + kw * DESD^{-0.2} \left[ \frac{1}{1 + \exp\{-(w - 75)\}} \right] \quad (39)$$

Donde :

$V_{50\%}$  : Tensión crítica de flameo [kV]

w : Grado de humedad [%]

kh y kw : Constantes obtenidas de pruebas de laboratorio bajo condiciones de ambiente seco y húmedo de la tensión de falla [3.1]

El grado de humedad se puede aproximar mediante la relación 40, [28].

$$w = \frac{\tan^{-1} \left\{ \left( \frac{m_0}{5 * DESD} \right) * \tan(62.5) \right\} + 62.5}{5} + 75 \quad (40)$$

Con lo anterior se puede describir el efecto de la humedad sobre la tensión crítica de flameo de un aislador contaminado. Esto se expresa en la figura 3.31.

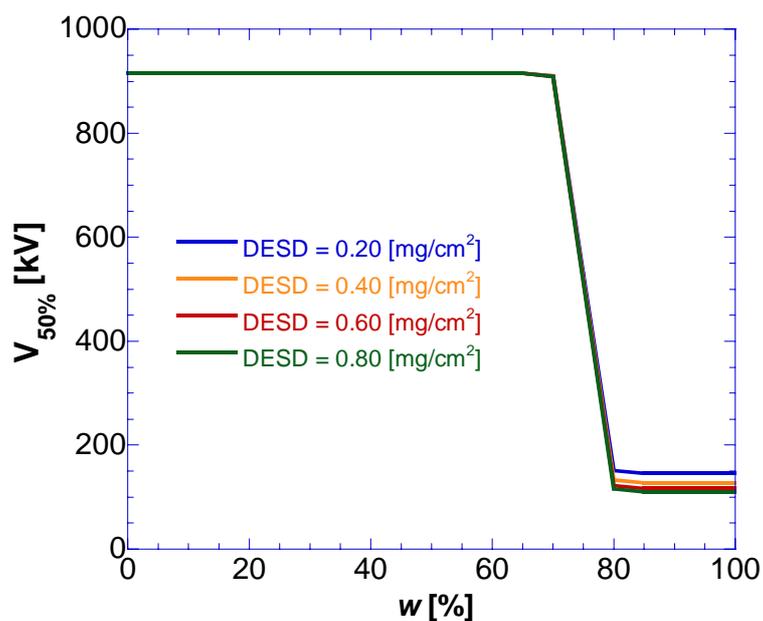


Figura 3.31. Tensión crítica de flameo en función del grado de humedad para diferentes niveles de contaminación.

En la figura 3.31, se observa que conforme aumenta el nivel de contaminación la tensión crítica de flameo disminuye. Conforme el grado de humedad aumenta la tensión de flameo disminuye. Esto se puede explicar que a mayor depósito de contaminante en la superficie del aislador bajo condiciones de humedad, promueve la aparición de bandas secas, que aumenta la conducción de corriente sobre la superficie del aislador hasta que provoca el flameo. Por lo que a mayor nivel de humedad la tensión crítica de flameo disminuye.

---

### 3.9. ASPECTOS GENERALES.

El nivel de contaminación expresado como la densidad equivalente de sal depositada es una variable estadística, que a su vez, permite determinar el voltaje crítico de flameo en función de ésta y permite ser representada mediante una función de distribución normal estadística. El empleo del método probabilístico permite determinar la probabilidad de falla de uno o varios aisladores instalados en paralelo que se encuentran sujetos a un mismo nivel de contaminación, permitiendo calcular el riesgo de falla para “n” cadenas de aisladores.

El empleo de dicho método es justificado ya que emplea variables aleatorias con distribución de probabilidad normal, como la DESD y el  $V_{50\%}$ , permitiendo representar de forma más adecuada el efecto de la contaminación que con el método determinístico [23].

De esta manera se consigue calcular el riesgo de falla para “n” cadenas de aisladores, considerando el efecto de la severidad de la contaminación del sitio donde se pretende hacer el estudio.

Otro de los factores que intervienen en la disminución de la tensión crítica de flameo es la humedad, que ante la presencia de ésta en los aisladores contaminados la tensión de flameo disminuye, ya que se facilita la conducción de corrientes sobre la superficie del aislador hasta alcanzar el flameo.

---

---

## **CAPÍTULO IV: DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE SALIDAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.**

### **4.1. INTRODUCCIÓN.**

El índice de salidas determina el tiempo promedio en que una línea está fuera de operación debido a eventos que provocaron una falla en el suministro de energía, como puede ser falla por contaminación y por descargas atmosféricas. El índice de salidas es un concepto probabilístico que se aplica a la planeación y operación de los sistemas eléctricos en forma directa e indirecta, que tiene que ver con algunos conceptos de diseño.

Para poder calcular el índice de salidas por descargas atmosféricas es necesario determinar la probabilidad de falla de una línea que está sometida a descargas atmosféricas. Para esto es necesario recurrir al estudio de las descargas atmosféricas sobre los sistemas eléctricos de potencia, lo cual se describe a continuación.

### **4.2. PROBABILIDAD DE FALLA DE LOS AISLAMIENTOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.**

Uno de los fenómenos que más afecta a los sistemas eléctricos de potencia son las descargas atmosféricas, en México es la causa principal de salidas de líneas de transmisión por falla propia seguida de la contaminación [30]. Las descargas atmosféricas son ajenas a los sistemas eléctricos, que tiene que ver con aspectos geográficos ambientales climatológicos. Para estudiar este efecto se puede plantear dividiendo el problema como se muestra a continuación:

- La teoría de las descargas atmosféricas
- Características del rayo
- Efecto del rayo sobre las componentes del sistema

---

---

#### 4.2.1. Teoría de las Descargas Atmosféricas.

El rayo es un fenómeno natural que no obedece una regla de comportamiento, para poder explicar su origen se establecen distintas teorías cuyo fin es explicar el fenómeno de descarga, que es finalmente lo que afecta a los sistemas eléctricos.

Las descargas atmosféricas se pueden presentar de nube a nube y de nube a tierra siendo esta última, la que afecta a los sistemas eléctricos.

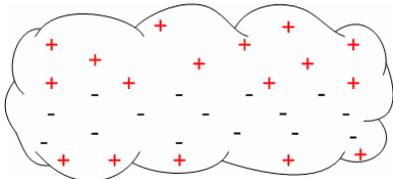
El tipo de descarga más común que produce problemas a líneas de transmisión es la descarga de nube a tierra con polaridad negativa [31].

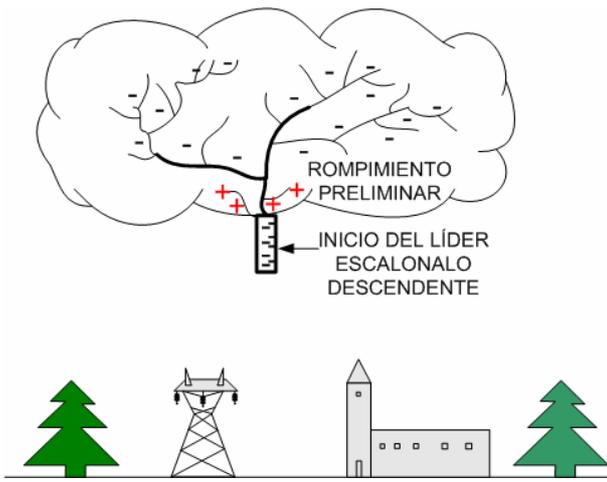
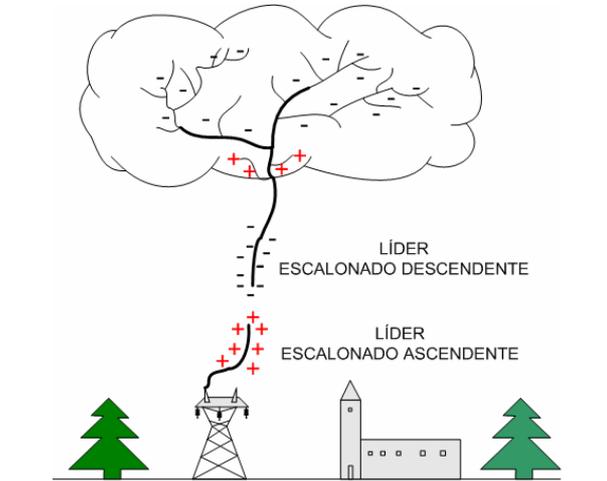
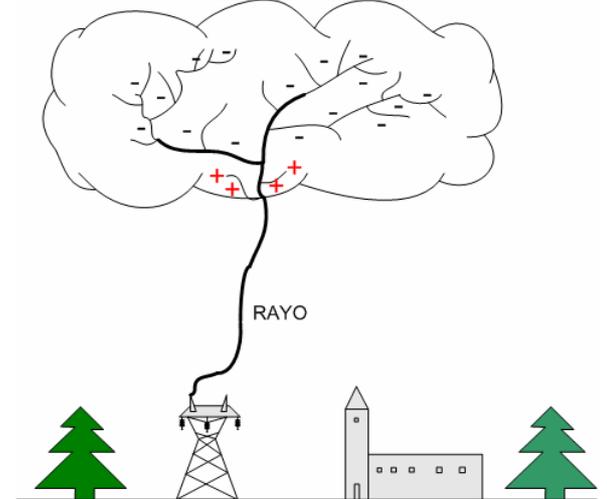
Las teorías existentes se basan en el fenómeno de formación de las nubes por vaporización del agua del mar, ríos, lagos, etc. Que por acción de los vientos se desplazan a las zonas más altas de los continentes.

Las nubes se forman de partículas de agua o hielo, que en presencia del campo magnético de la tierra, adquieren una polaridad comportándose como cargas electrostáticas positivas y negativas dentro de la nube.

El proceso de descarga se puede describir de forma general como se indica en la tabla 4.1, [32].

Tabla 4.1. Etapas de formación del rayo.

<b>ETAPAS DEL RAYO</b>	<b>ESQUEMA</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
Nube de tormenta	 El diagrama muestra una nube con una forma irregular y ondulada. Dentro de la nube, se encuentran varias partículas representadas por signos de más (+) y menos (-). Los signos de más (+) están distribuidos principalmente en la parte superior de la nube, mientras que los signos de menos (-) están distribuidos principalmente en la parte inferior. Hay un total de 12 signos de más (+) y 12 signos de menos (-).	<ul style="list-style-type: none"><li>- El principal mecanismo generador de carga en la nube es la colisión entre partículas.</li><li>- Las cargas electrostáticas generadas pueden ser positiva y negativas.</li></ul>

<p>Rompimiento preliminar</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- La diferencia de potencial que generan las cargas electrostáticas dentro de la nube empiezan a generar canales de conducción dentro de la nube.</li> <li>- Se inicia el líder descendente en los límites de la nube provocado por la diferencia de potencial entre la nube y el aire, formando un canal de conducción.</li> </ul>
<p>Líder descendente y ascendente</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- El líder descendente se establece mediante un canal de conducción de corriente de cierta polaridad.</li> <li>- Las diferencias de potencial existentes entre el suelo y la nube generan un canal de conducción en las partes aterrizadas con polaridad diferente a la que presenta el líder descendente.</li> </ul>
<p>Ultimo paso</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los canales de conducción descendente y ascendente disminuyen la distancia dieléctrica entre el suelo y la tierra provocando un rompimiento dieléctrico transitorio con una duración menor a un segundo a lo largo de la trayectoria generado de la nube a la tierra.</li> </ul>

---

---

### 4.3. ÍNDICE DE SALIDAS.

Para analizar el comportamiento de una línea de transmisión se debe analizar las causas de falla y su frecuencia de ocurrencia, para esto se hace una revisión de las fallas de la línea que son tipificadas como:

- Fallas por descarga atmosférica
- Fallas por contaminación
- Fallas por efecto de brecha
- Fallas por vandalismo
- Fallas de herrajes
- Fallas por quema de brecha

Todas las fallas se cuantifican en número para determinar su densidad que se expresa como índice de salidas de la línea y que se expresa como la ecuación 41:

$$\text{Índice de salidas} = \frac{\text{número de fallas totales}}{\text{longitud de la línea}} * 100 \quad (41)$$

### 4.4. PROGRAMA FLASH.

Como se ha mencionado las descargas atmosféricas es una de las causas más frecuentes de fallas de la línea. El análisis de este fenómeno se basa en el estudio de las fallas de blindaje, fallas por alta resistencia al pie de la torre y fallas por blindaje deficiente.

El estudio de este tipo de fallas se puede realizar haciendo uso de un programa llamado FLASH que desarrolló el IEEE y que se basa en la teoría de las descargas atmosféricas. En dicho programa se analizan aspectos como [33], [34], [35]:

- Trayectoria de la línea
- Tipo de estructuras
- El blindaje
- Resistencia al pie de la torre

Este programa es aplicable a líneas de transmisión de 69 kV o de tensiones mayores.

#### 4.5. RESULTADOS DEL PROGRAMA FLASH.

Con la finalidad de obtener los índices de salida que pudieran causar las descargas atmosféricas sobre una línea de transmisión se considerando una línea de transmisión de 400 kV que tiene 100 km de longitud con un claro entre torres de 400 m. Si la línea cuenta con torres de transmisión de tipo waist, como se muestra en la siguiente figura, y esta localizada en terreno plano con una resistencia al pie de la torre de 5  $\Omega$ .

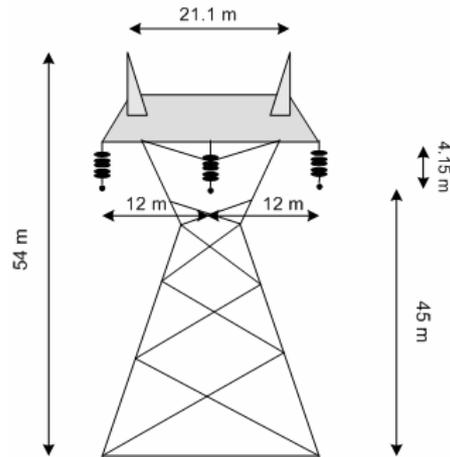


Figura 4.1. Torre de 400 kV tipo 4BC1.

Para la estructura mostrada en la figura 4.1, el índice de salidas que presenta la línea por falla de blindaje y flameo inverso es como se indica en la figura 4.2.

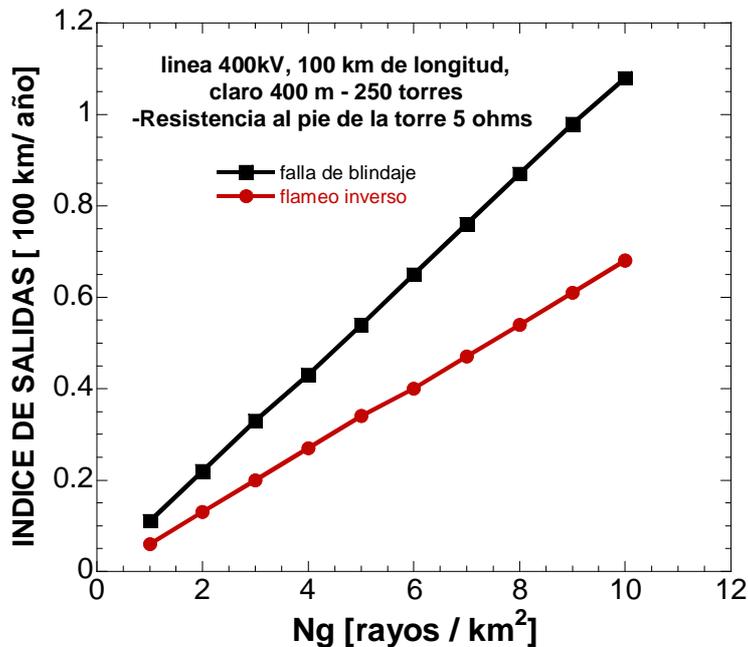


Figura 4.2. Índices de salidas por falla de blindaje y flameo inverso para diferentes  $N_g$ .

---

En la figura 4.2, se observa que las fallas por descarga atmosférica se presentan más por falla de blindaje, que por flameo inverso.

Si la línea presentara diferente resistencia al pie de la torre, el índice de salidas se comporta como lo muestra la figura 4.3.

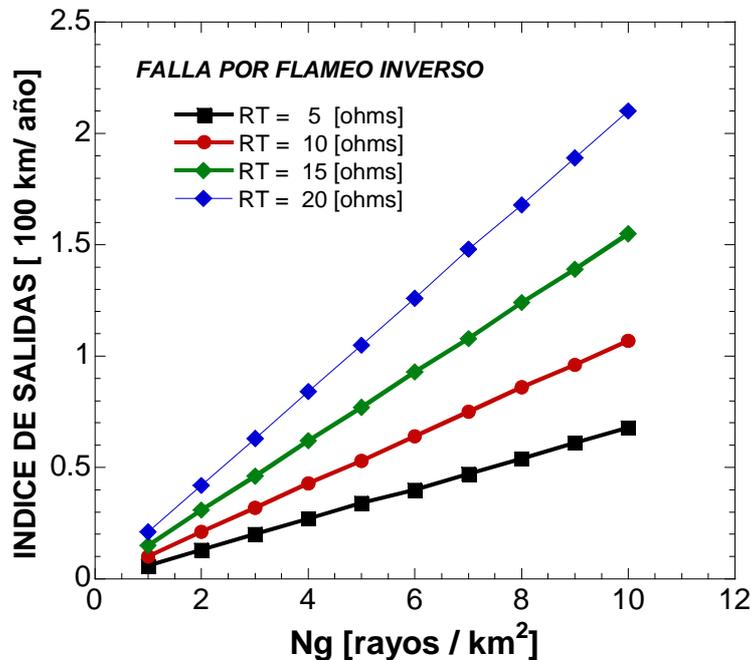


Figura 4.3. Índices de salidas por flameo inverso, con diferente RT para diferentes Ng.

En la figura 4.3, se puede ver que los índices de salidas aumentan por falla de flameo inverso cuando la resistencia al pie de la torre aumenta. Esto se debe a que se presentan problemas de reflexión de onda de voltaje que se presenta cuando la resistencia al pie de la torre es alta.

Si a las torres de transmisión se les modificara el ángulo de blindaje, el índice de salidas por falla de blindaje sería como en la figura 4.4, donde se observa que aumenta el índice de salidas cuando el ángulo de blindaje aumenta.

Por otro lado se puede observar que al aumentar la densidad de rayos a tierra el índice de salidas aumenta.

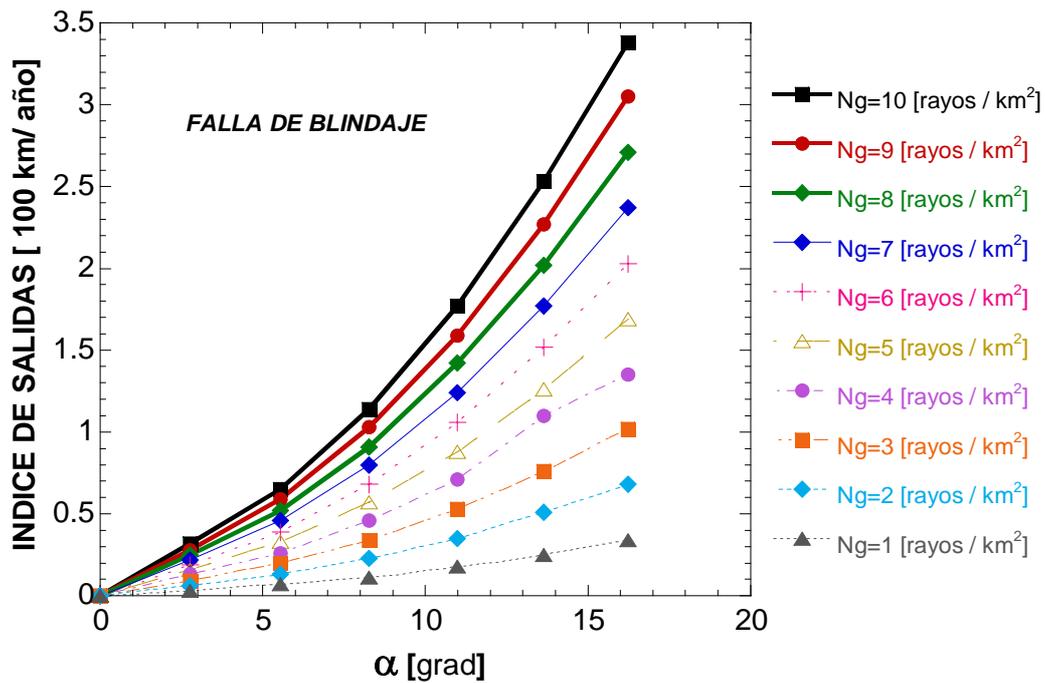


Figura 4.4. Índices de salidas por falla de blindaje con diferente ángulo de blindaje para diferentes  $N_g$ .

Como las estructuras ya instaladas en líneas de transmisión cuentan con un determinado ángulo de blindaje y una resistencia al pie de la torre dada por las condiciones del terreno, la densidad de rayos a tierra influye directamente en el índice de salidas que tenga dicha línea.

---

---

#### 4.6. ASPECTOS GENERALES.

Dentro de las fallas que se presentan en las líneas de transmisión y que se denominan como propias, las descargas atmosféricas son la principal causa de falla seguidas por la contaminación en aislamientos externos, por lo que, es necesario estudiar el efecto que tienen las descargas atmosféricas y la contaminación ambiental sobre los índices de salidas de las líneas de transmisión.

Las descargas atmosféricas pueden causar falla por flameo inverso o por falla de blindaje, que dependen de la resistencia al pie de la torre y de la topología de la torre de la línea. Se puede decir, que tanto la resistencia al pie de la torre varía dependiendo de la resistividad del terreno que depende del clima como lluvia o sequías. El ángulo de blindaje es un valor que no varía, ya que desde el diseño de la torre se adopta un valor. Con esto se puede decir que las salidas por descarga atmosférica dependen de la densidad de rayos a tierra que se tenga en la zona donde se localice la línea. Por otro lado, las salidas por contaminación dependen básicamente del nivel de contaminación y de la longitud de la línea afectada por un mismo nivel de contaminación.

Para reducir el número de salidas por contaminación es necesario cuantificar los índices de salidas en líneas donde el nivel de contaminación es lo suficientemente predominante como para provocar fallas en los aislamientos, el método probabilístico permite evaluar la probabilidad de falla en los aislamientos contaminados y con esto determinar el índice de salidas en función del nivel de contaminación y de la longitud de la línea.

Con estos resultados se puede prever, en que zonas se corre el riesgo de tener falla por contaminación y poder adoptar medidas preventivas o correctivas en el aislamiento para evitar las fallas por contaminación. Aunado a esto, si la línea estudiada por efecto de la contaminación presenta un alto nivel de densidad de rayos a tierra en la región en donde se localiza la línea, los índices de salida aumentaran considerablemente ya que son dos factores que pueden ocasionar fallas y por tanto reducir la confiabilidad de la línea.

---

---

## CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1. RESULTADOS DEL PROGRAMA DESARROLLADO EN FORTRAN.

Con el programa desarrollado en fortran para el cálculo de la probabilidad de falla en “n” número de cadenas de aisladores en paralelo por efecto de la contaminación, permitió tomar en cuenta la tensión crítica de flameo en función del nivel de contaminación, así como el número de cadenas de aisladores expuestas a la contaminación.

Para poder simular el efecto de la contaminación sobre los aislamientos externos, fue necesario recurrir a expresiones matemáticas obtenidas de pruebas de laboratorio, que caracterizaran el comportamiento de la tensión crítica de flameo en función del nivel de contaminación.

Para determinar la probabilidad de falla acumulativa se empleó la función de distribución normal, ya que permite representar la tensión crítica de flameo como una variable probabilística, y por lo tanto, poder calcular la probabilidad de falla acumulativa en “n” número de cadenas de aisladores en paralelo, en función de la variación del nivel de contaminación.

Para aplicar la función de distribución normal en el diseño de aislamiento se deben tomar consideraciones como las siguientes:

- La línea de transmisión debe dividirse por secciones de igual nivel de contaminación y que se tienen “n” número de cadenas de aisladores en paralelo expuestas simultáneamente al mismo nivel de contaminación.
- Se considera en dicha sección, el efecto de la contaminación sobre los aislamientos esta dada por la ecuación de la tensión crítica de flameo, obtenida de pruebas de laboratorio y que esta en función del nivel de contaminación.
- Los valores de la tensión crítica de flameo y de la desviación estándar son independientes de la longitud de la cadena de aisladores.
- El flameo de cada uno de los aisladores es independiente.

---

---

De los resultados arrojados se puede decir que la probabilidad de falla está en función de:

- El nivel de contaminación en la sección de la línea.
- El número de cadenas de aisladores.
- La probabilidad de falla de una sección de línea de transmisión es más sensible a los cambios del nivel de contaminación, que al cambio del número de aisladores considerados en dicha sección.

Por otro lado, la tensión crítica de flameo depende de la posición de la cadena de aisladores, para aisladores en posición “T” la tensión crítica de flameo es menor que para la configuración “V”. Lo anterior se debe a que un aislador en posición “T” se contamina más que un aislador en posición “V”.

Con los resultados de la probabilidad de falla se determinó el índice de salidas por efecto de la contaminación, donde se puede observar que el índice de salidas depende de:

- El nivel de contaminación.
- El número de cadenas de aisladores, y por lo tanto, de la longitud de la sección de la línea

## **5.2. RESULTADOS DEL PROGRAMA FLASH.**

Con el programa FLASH se pudo determinar el índice de salidas por efecto de las descargas atmosféricas, tomando en consideración las siguientes variables:

- Geometría de los conductores de fase y de los cables de guarda en la torre.
- Tipo de estructuras
- El blindaje
- Resistencia al pie de la torre

Tomando en cuenta dichas variables, de los resultados que arrojó el programa, se puede decir que los índices de salida por efecto de las descargas atmosféricas esta en función de:

- La resistencia al pie de la torre
- El ángulo de blindaje
- La densidad de rayos a tierra

### 5.3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS.

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, existen diferentes pruebas normalizadas de laboratorio para determinar el voltaje crítico de flameo, como la de niebla limpia y niebla salina. En el presente trabajo se tomó como referencia la expresión matemática obtenida de la tensión crítica de flameo que describe su comportamiento como función de la densidad equivalente de sal depositada [37], y tiene la forma:

$$V(DES D) = 15.08 * 46.78^{-(DES D)}$$

En la figura siguiente se muestra el comportamiento de la tensión de aguante en función de la densidad equivalente de sal depositada:

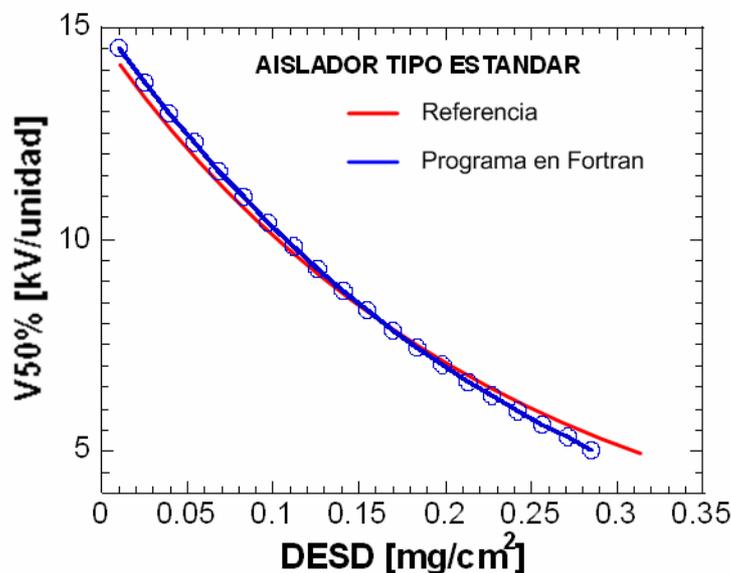


Figura 5.1.  $V_{50\%}$  en función de la DESD.

A continuación se muestra la probabilidad de falla acumulativa para 45 cadenas de aisladores en paralelo, se puede observar una diferencia en las curvas (la de referencia y la obtenida con el programa desarrollado en Fortran), y esto se debe a que la tendencia

de acumulación del contaminante no se da en el artículo, por lo que solo se toman como referencia el valor inicial y el final, tomando una acumulación lineal y debido a que se obtienen de pruebas de laboratorio esta acumulación puede no serlo [37], [38].

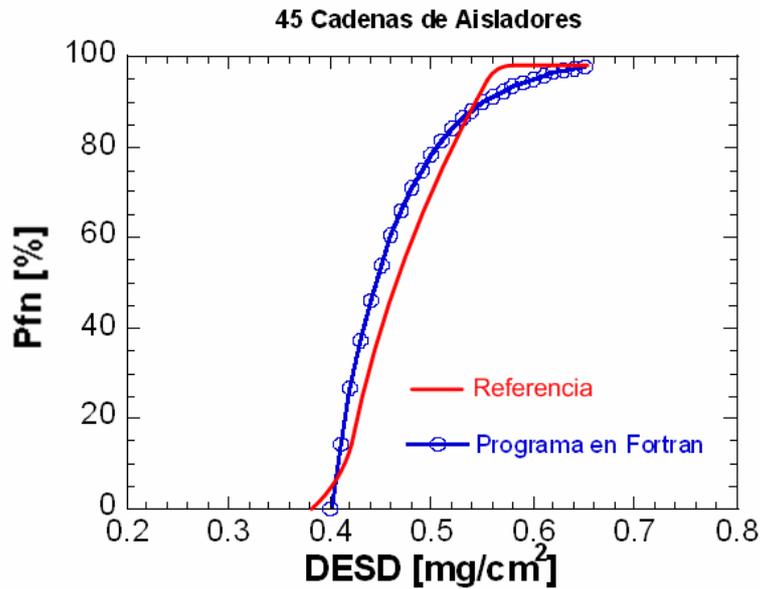


Figura 5.2. Probabilidad de falla acumulativa en función de la DESD.

En las figuras 5.3 y 5.4, se muestra la densidad de absorción como función de la densidad equivalente de sal depositada, la cual se emplea para determinar la tensión crítica de flameo en función de la humedad (la cual se muestra más adelante) [39].

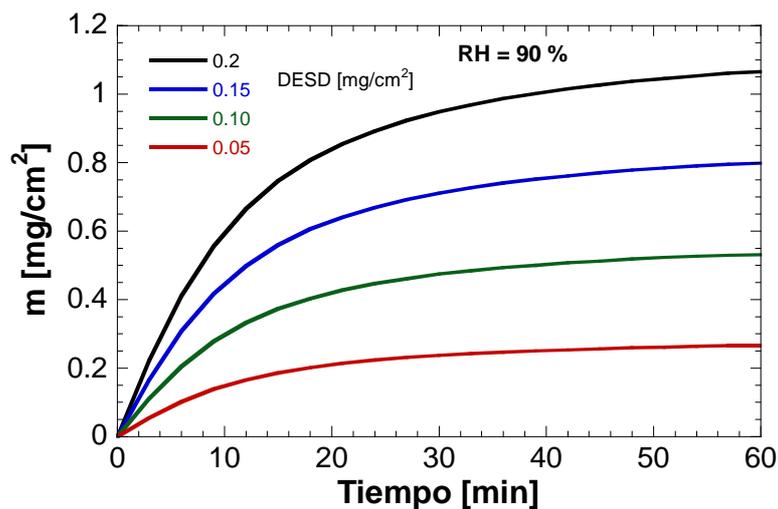


Figura 5.3. Densidad de absorción de humedad para diferentes niveles de contaminación y RH constante, obtenida con el programa desarrollado en Fortran.

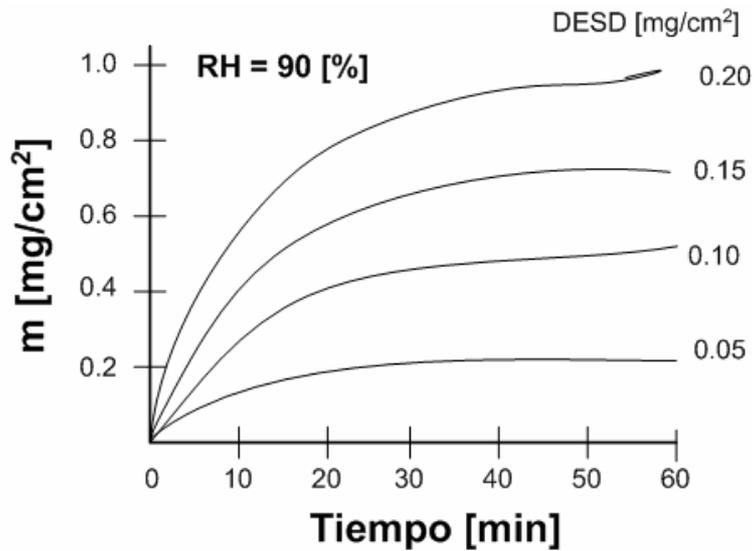


Figura 5.4. Densidad de absorción de humedad para diferentes niveles de contaminación y RH constante, Referencia.

El efecto de la humedad sobre la tensión crítica de flameo se determinó empleando la ecuación obtenida de los artículos [39], [40], [41] que tiene la forma siguiente:

$$V_{50\%} = kh \left[ 1 - \frac{1}{1 + \exp\{-(w - 75)\}} \right] + kw * DESD^{-0.2} \left[ \frac{1}{1 + \exp\{-(w - 75)\}} \right]$$

A continuación se muestran las gráficas que representan el efecto de la humedad sobre la tensión crítica de flameo, primero la obtenida con el programa fortran y después la de referencia [39]:

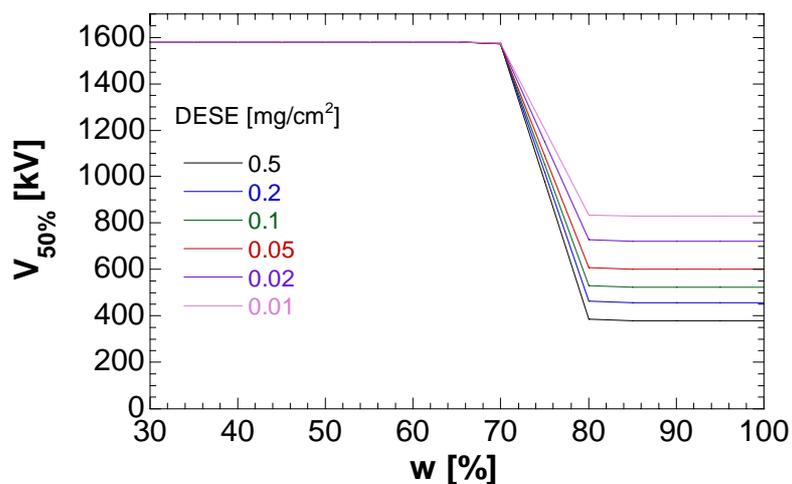


Figura 5.5. Tensión crítica de flameo en función del nivel de humedad, gráfica obtenida en Fortran.

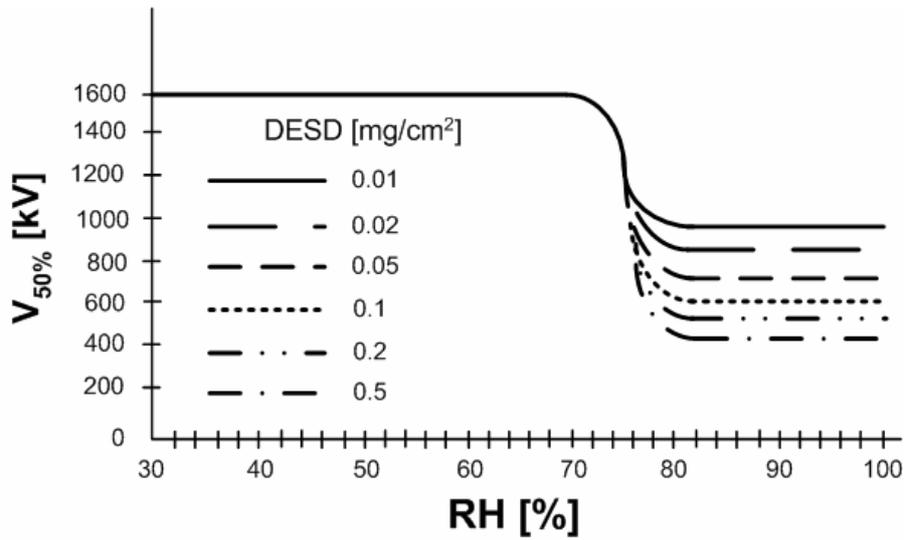


Figura 5.6. Tensión crítica de flameo en función del nivel de humedad, gráfica de referencia.

Con las figuras mostradas anteriormente se trata de validar algunos de los resultados más importantes obtenidos en el presente trabajo, empleando ecuaciones obtenidas de estudios anteriores y aplicándolas a los diferentes casos descritos en el cuerpo del trabajo.

---

---

## **CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

### **6.1. CONCLUSIONES.**

De los resultados que arrojó el presente trabajo se puede concluir que:

- La contaminación ambiental sobre aislamientos externos se puede simular empleando el método probabilístico, permitiendo desarrollar un procedimiento general aplicable a cualquier línea de transmisión, considerando diferentes niveles de contaminación.
- La tensión crítica de flameo de una cadena de aisladores se ve afectada por el depósito de contaminante sobre la superficie de los aisladores, de tal forma que la tensión de flameo disminuye conforme aumenta el nivel de contaminación en los aisladores.
- La tensión crítica de flameo de un aislador contaminado es menor cuando está en posición vertical que cuando está en posición “V”, ya que la cadena en posición “I” se contamina más.
- La tensión crítica de flameo de aisladores contaminados se ve afectada por la humedad. Se observó que la tensión crítica de flameo disminuye si el grado de humedad aumenta.
- El método probabilístico empleado permitió determinar la probabilidad acumulativa de falla de “n” cadenas de aisladores en paralelo en función de la contaminación.
- La probabilidad de falla aumenta, cuando el número de cadenas de aisladores en paralelo expuestas a un mismo nivel de contaminación aumenta.
- También se observó que, para un mismo número de cadenas de aisladores aumenta la probabilidad de falla cuando el nivel de contaminación aumenta.
- La probabilidad de falla por contaminación de una línea de transmisión es más sensible a los cambios del nivel de contaminación, que al número de aisladores expuestos a la contaminación.

- 
- El número de aisladores requeridos en una cadena bajo condiciones de contaminación depende del tipo de aislador, si la distancia de fuga del aislador aumenta se requerirá menor número de estos y viceversa. Si el nivel de contaminación aumenta se ocupará un mayor número de unidades.
  - Para los índices de salida obtenidos para el efecto de la contaminación, se observó que dependen del nivel de contaminación. Si la severidad de la contaminación crece los índices de salida aumentan.
  - El índice de salidas por contaminación depende proporcionalmente de la longitud de la línea y por tanto, del número de cadenas de aisladores expuestas a la contaminación.
  - El efecto de las descargas atmosféricas sobre una línea de transmisión se evaluó empleando el programa FLASH, dando como resultados que el índice de salidas aumenta si: la resistencia al pie de la torre aumenta, el ángulo de blindaje aumenta y la densidad de rayos a tierra aumenta.

---

---

## 6.2. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.

Dentro del ámbito de los problemas de contaminación en las instalaciones eléctricas, existen diversos factores que afectan el comportamiento de los aisladores en operación y que han sido estudiados de forma experimental en su mayoría. De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente trabajo y otros estudios que se han realizado se propone como trabajos futuros los siguientes puntos:

- Se han realizado estudios de la influencia de la altura sobre el nivel del mar en la tensión crítica de flameo de aisladores, empleando pruebas de laboratorio como el método de niebla limpia o salina. De lo anterior se propone modelar analíticamente la tensión crítica de flameo en función de la presión atmosférica en aislamientos contaminados, ya que dependiendo de la localización geográfica de la línea de transmisión, varía la altura sobre el nivel del mar, así como el nivel de contaminación presente en la zona.

Dentro de las condiciones naturales climatológicas que prevalecen en una zona determinada existen otros factores que influyen en la severidad de la contaminación, que han sido observados en pruebas de laboratorio y en las instalaciones eléctricas en operación, que pueden ser estudiados de forma particular como:

- La cercanía al mar. Se ha observado que dependiendo de la distancia entre el mar y una instalación eléctrica puede variar el nivel de contaminación depositado en los aislamientos. Por lo que, se propone determinar la dinámica de acumulación de contaminantes en función de la distancia de cercanía al mar de las instalaciones eléctricas. Esto permitirá conocer como varía el nivel de contaminación a medida que las instalaciones se alejan de la costa y por tanto diseñar en forma óptima la distancia de fuga requerida en este tipo de líneas de transmisión.
- Tormentas de arena. En líneas de transmisión cercanas a los desiertos se presentan las tormentas de arena, que según informes de operación influyen en el comportamiento de los aislamientos expuestos a la arena de los desiertos, provocando fallas por contaminación inesperadas. Por lo que se propone hacer

---

---

una simulación analítica de dicho efecto para poder predecir el comportamiento de los aisladores en función de las tormentas de arena.

- Lavado por lluvia natural. De forma natural se presenta un lavado parcial o total de los aisladores contaminados, causado por la lluvia natural del entorno geográfico y que esta en función del periodo de exposición, el tipo de contaminante y de la superficie del aislador. De tal manera que simular analíticamente este proceso ayudaría a mejorar o proponer nuevos programas de mantenimiento de aisladores contaminados.
- Guano de ave. Se ha observado en pruebas de laboratorio de aisladores contaminados, con y sin excremento de aves, que aumenta la conductividad del contaminante de forma considerable, lo que implica que el excremento de las aves pueden ocasionar fallas por contaminación.

Dentro de las investigaciones futuras, también se propone efectuar pruebas de laboratorio para observar el comportamiento de los aisladores contaminados bajo los siguientes factores:

- Contaminantes típicos del país. Lo que permitirá evaluar de forma más precisa el comportamiento de los aislamientos ante diferentes tipos de contaminantes, que además, se presentan en diferentes regiones del país, ayudando al dimensionamiento óptimo del aislamiento en líneas de transmisión y subestaciones eléctricas.
- Tipo de aislador. Se ha reportado un comportamiento diferente en los aislamientos, según el material del que estén hechos. Ya sea de vidrio, porcelana o los llamados “no cerámicos” se comportan de manera diferente ante condiciones de contaminación. Por lo que se propone realizar pruebas que permitan observar el comportamiento de los aisladores en presencia de los diferentes tipos de contaminación y así seleccionar adecuadamente el tipo de aislador en función del tipo del contaminante presente.

---

---

## REFERENCIAS

- [1]. CFE, Coordinadora de Transmisión y Transformación. IIE., “*Guía de Procedimientos de Diseño para Aislamientos Externos de Líneas y Subestaciones Eléctricas expuestas en Ambientes Contaminados*”, 1990.
- [2]. J. Gerardo Montoya Tena., “*Predicción de sistemas Dinámicos*” Aplicación al Proceso de Contaminación en Aislamientos Externos., Tesis; Facultad de Ingeniería Eléctrica UNAM.
- [3]. IEEE Std 1313.2 - 1999., “*IEEE Guide for the Application of Insulation Coordination*”, IEEE Power Engineering Society.
- [4]. Mohamed M., Hassaan M., Bahaa A. “*Effect of Sandstorms wit Charged Particles on The Flashover and Breakdown of Transmission Lines*”, CIGRE, Paris, 2002.
- [5]. Hama, Abdel – Salam; Abdelgawad, Nagat; Arafa, Bahaa., “*Effect of Desert Environmental Conditions on the Flashover Voltage of insulators*”., Energy Conversion and Managment, v 43 n 17 Nov 2002. p 2437 - 2442.
- [6]. IEEE Std 957 - 1995, “*Guide for Cleaning Insulators*” IEEE Power Engineering Society.
- [7]. ELECTRA, “*The Measurement of Site Pollution Severity and its Application to Insulator Dimensioning for A.C. Systems*”.
- [8]. CFE, Coordinadora de Transmisión y Transformación., “*Fallas en Líneas de Transmisión, Estadística y Eventos Relevantes*”, México DF 2002.
- [9]. IEC NORMA 815, “*Guide for the Selection of Insulators in Respect of polluted conditions*”, 1986.
- [10]. IEEE std 1243., “*IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines*”, IEEE, 1997.
- [11]. Global Soluciones., “*Historia de los aisladores de porcelana, Artículo Técnico*”., [www.globalsoluciones.cl](http://www.globalsoluciones.cl).
- [12]. Kapal Sharma., “*Technical Article, Polymeric Insulators*”. R. E. T.
- [13]. Tsong – Shiann, Shih – Shong., “*Study on the Leakage Current Characteristics of the Salt Contaminated Insulators*”., Institute of Technology, Power Research Institute.
- [14]. Ling An, Xiuchen J., “*Measurements of Equivalent Salt Deposit Density (ESDD) on a Suspension Insulator*”., IEEE, 7 March 2002.
- [15]. K. Naito, Y. Mizuno, W. Naganawa., “*A Study on Probabilistic Assessment of Contamination Flashover of High Voltage Insulator*”, Trans. IEEE – Delivery, Vol. 10, No. 3, July 1995.
- [16]. IEEE Std 1313.2 - 1999., “*Application Guide for Insulators in a Contaminated Environment*”, IEEE Paper No. F 77 639 – 8, 1977.

- 
- 
- [17]. Kimoto I., Fujimura T. and Naito K., “*Performance of Heavy Duty UHV Disc Insulators Under Polluted Conditions*”, IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, 1972, Vol. Pas – 91, No. 1, pp 311 - 316.
- [18]. Kimoto L., Kito K. and Takatori T., “*Anti – Pollution Design Criteria for Line and Station Insulators*”, IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, 1972, Vol. Pas – 91, No. 1, pp 317 - 327.
- [19]. Gilberto Enríquez Harper., “*Métodos Computacionales para Ingeniería de las Altas Tensiones*”, Limusa editores.
- [20]. NORMA IEC 507, “*Artificial pollution Tests on High – Voltage Insulators to be Used on A.C. Systems*”, 1991
- [21]. G. Karaday, D. Dallaire, D. Mukhedkar., “*Statistical Method for Transmission Line Insulation Design for Polluted Areas*”, Trans. IEEE – Pas, 1983.
- [22]. Instituto de Investigaciones Eléctricas, “*Folleto Informativo: Coordinación de Aislamiento por Descargas Atmosféricas en Líneas de Transmisión*”, Enero 1996.
- [23]. Mendenhall, W., Richard, L., “*Mathematical Statistical with Applications*”, Iberoamericana, 1986.
- [24]. Hald, “*Statistical Theory With Engineering Applications*”, John Wiley and Sons Inc.
- [25]. Y Suzuki, T Fukuta, K. Naito., “*Probabilistic Assessment of Flashover Performance of Transmission Lines in Contaminated Areas.*”, Trans. IEEE. Vol. 6, No. 3, June 1999.
- [26]. NORMA IEC 71 - 2., “*Insulation Co-ordination Application Guide*”, 1996.
- [27]. Andrew R. H., “*Insulation Coordination for Power Systems*”, Marcel Dekker, Inc, 1999.
- [28]. Y Mizuno, H Nakamura, K. Naito., “*Dynamic Simulation of Risk of Flashover of Contaminated Ceramic Insulators.*”, Trans. IEEE. Vol. 12, No. 3, July 1997.
- [29]. J. Bezarra, A Lima, “*Application of Risk Criteria on Transmission Systems Insulation Upgrade.*”, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. IEEE, 2002.
- [30]. CFE, Coordinadora de Transmisión y Transformación., “*Fallas en Líneas de Transmisión, Estadística y Eventos Relevantes*”, México DF 2002.
- [31]. Instituto de Investigaciones Eléctricas, “*Folleto Informativo: Coordinación de Aislamiento por Descargas Atmosféricas en Líneas de Transmisión*”, Enero 1996.
- [32]. CESCA, “*Descripción Física del Rayo, Parámetros*”, [www.tdx.cesca.es](http://www.tdx.cesca.es).
- [33]. IEEE std 1243., “*IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines*”, IEEE, 1997.
- [34]. J. G. Anderson, Transmission Line Reference Book , 345 kV and above, 2d ed. Palo Alto California 1992.
- 
-

- 
- 
- [35]. IEEE Working Group on Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines, 'A Simplified Method for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines', IEEE Transaction of power apparatus and systems, vol. PAS – 104, pp. 919 – 932, 1985.
- [36]. IEEE Working Group on Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines, 'IEEE Working Group Report - Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II – Updates to Analytical Models', IEEE Transaction on power Delivery, vol. PWRD - 8, no. 3, pp. 1254 – 1267, 1993.
- [37]. G. Karaday, D. Dallaire, D. Mukhedkar., "Statistical Method for Transmission Line Insulation Design for Polluted Areas", Trans. IEEE – Pas, 1983.
- [38]. Gilberto Enríquez Harper., "Métodos Computacionales para Ingeniería de las Altas Tensiones"., Limusa editores.
- [39]. Y Mizuno, H Nakamura, K. Naito., "Dynamic Simulation of Risk of Flashover of Contaminated Ceramic Insulators.", Trans. IEEE. Vol. 12, No. 3, July 1997.
- [40]. J Bezarra, A Lima, "Application of Risk Criteria on Transmission Systems Insulation Upgrade.", Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. IEEE, 2002.
- [41]. K. Naito, Y. Mizuno, W. Naganawa., "A Study on Probabilistic Assessment of Contamination Flashover of High Voltage Insulator", Trans. IEEE – Delivery, Vol. 10, No. 3, July 1995.
- [42]. J. G. Anderson, 'Lightning Performance of Transmission Lines', Transmission Line Reference Book , Palo Alto California 1991.
- [43]. IEEE Working Group on Lightning Performance of Transmission Lines, 'A Simplified Method for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines', IEEE Trans. on Pas, Apr. 1987, pp. 899 – 907.
- [44]. Andrew R, 'Insulation Coordination for Power Systems', Marcel Dekker, Inc.
- [45]. A. J. Eriksson, 'The Incidence of lightning Strikes to Transmission Lines', IEEE Trans. on Power Delivery, Jul. 1987, pp. 856 – 870.
- [46]. IEEE., "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines", IEEE, 1997.
- [47]. IEEE Working Group, 'Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines II', IEEE Trans. on Power Delivery, Jul. 1993, pp. 1254 – 1267.

---

---

## APÉNDICE A: TEORÍA DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.

### A.1. CARACTERÍSTICAS DEL RAYO.

Para comprender el efecto de las descargas atmosféricas, primero se debe identificar la actividad atmosférica expresada como el número de rayos que inciden sobre una zona geográfica, esta cantidad puede ser expresada por dos conceptos:

- Nivel ceraúnico
- Densidad de rayos a tierra

### A.2. DENSIDAD DE RAYOS A TIERRA.

Cuando se diseñan líneas de transmisión a la intemperie o subestaciones eléctricas aisladas en aire, se debe tener una idea de la actividad atmosférica, la cual se expresa en términos del nivel ceraúnico, que expresa el número promedio de días con tormenta anual en un sitio determinado.

El nivel ceraúnico permite determinar la densidad de rayos a tierra que expresa el número de rayos que incide en una zona por kilómetro cuadrado, y que está dada por la expresión A.1, [33], [42].

$$Ng = 0.04 * DT^{1.25} \quad (A.1)$$

Donde :

Ng : Densidad de rayos a tierra

DT : Nivel ceraúnico

Actualmente se cuenta con mapas que unen puntos geográficos con igual nivel ceraúnico, a estos se les conoce como mapas isoceraúnicos, donde se representan valores promedio de un lapso de 11 años de medición. Este periodo de tiempo está determinado por un ciclo solar, el cual representa el efecto de las descargas sobre la

---

tierra, para distintas posiciones relativas con respecto al sol. Como muestra de este tipo de mapas isoceraúnicos se presenta la figura A.1.

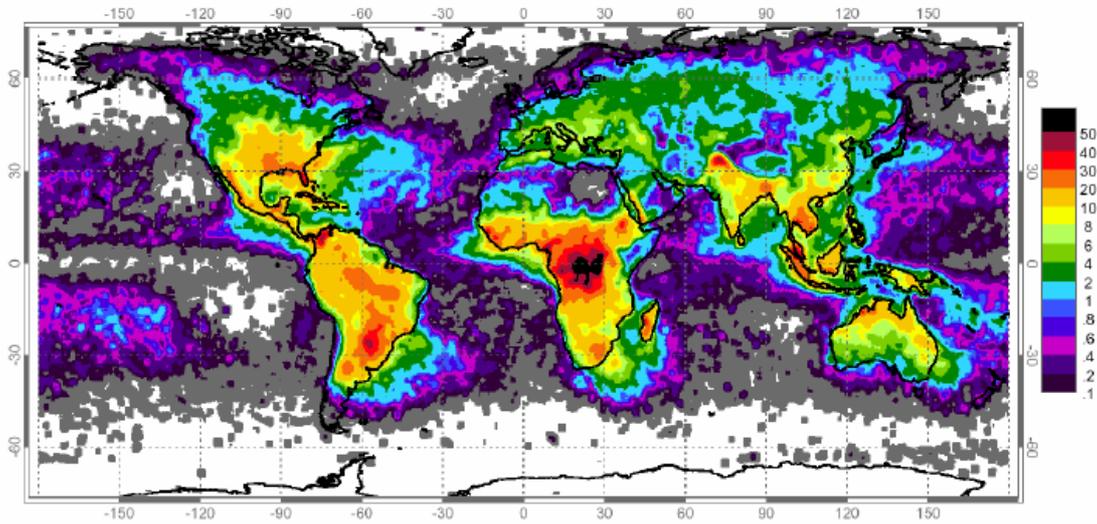


Figura A.1. Mapa mundial de densidad de rayos a tierra por km<sup>2</sup> en un año.

### A.3. MAGNITUD Y FORMA DE LA CORRIENTE DEL RAYO.

Para fines de diseño de los sistemas eléctricos contra las descargas atmosféricas, es necesario estimar la magnitud esperada de la corriente del rayo en kA y adicionalmente determinar la forma de onda representativa que se induce sobre los conductores. Las mediciones de la corriente del rayo establecen que se trata de un fenómeno probabilístico y establece un patrón determinado que se puede expresar en términos de una distribución probabilística dada por la expresión A.2, [33], [42], [43].

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}} \quad (\text{A.2})$$

Donde :

P(I) : Probabilidad de ocurrencia a una corriente de rayo de valor I

I : Magnitud de la corriente del rayo

---

---

Cuando la onda del rayo impacta sobre alguna componente del sistema, como las líneas de transmisión, entonces se convierte en una onda de voltaje unidireccional, que en el caso de los conductores aéreos se divide en dos en el punto de impacto.

La onda de corriente hace aparecer en los conductores de fase una onda de voltaje con un valor dado por la expresión A.3, [44].

$$v = Z_0 * \frac{I}{2} \quad (\text{A.3})$$

Donde :

I : Corriente del rayo [kA]

$Z_0$  : Impedancia característica de la línea

Este valor puede ser estimado suponiendo una trayectoria homogénea de la línea, es decir, no tomando en cuenta el efecto del suelo por variación topográfica a lo largo de la trayectoria de la línea.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\text{A.4})$$

Los transitorios producidos por descargas atmosféricas directas en líneas de transmisión y los esfuerzos a los que se ve sometido el aislamiento eléctrico pueden analizarse por medio de simulaciones usando formas de onda normalizadas. Para el caso de la onda de voltaje producida por el rayo es de 1.2/50  $\mu\text{s}$  la cual se muestra en la figura A.2, [33].

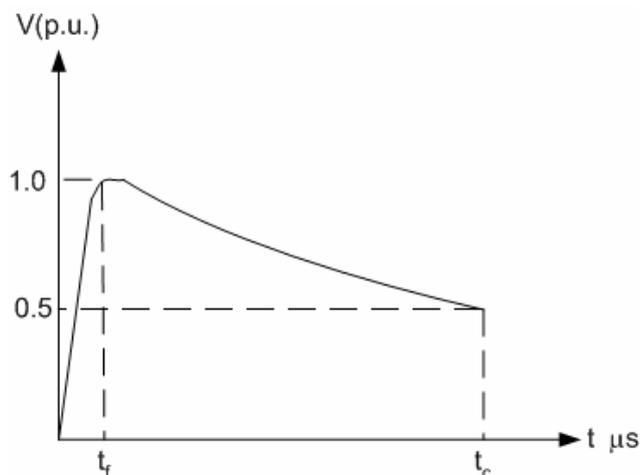


Figura A.2. Onda normalizada de impulso de voltaje por rayo.

---

---

Donde :

$t_f$  : Tiempo de frente [ $\mu s$ ]

$t_c$  : Tiempo de cola [ $\mu s$ ]

#### **A.4. EFECTO DEL RAYO SOBRE LAS COMPONENTES DEL SISTEMA.**

Para el estudio del efecto de las sobretensiones por descarga atmosférica, se suponen tres posibilidades en que el rayo puede impactar a una línea de transmisión, las cuales son:

- Descarga a los conductores de fase
- Descarga a los cables de guarda
- Descarga a las estructuras o torres

#### **A.5. DESCARGA A LOS CONDUCTORES DE FASE.**

Para una región con cierta densidad de rayos a tierra, un cierto número de rayos puede incidir sobre la línea de transmisión, la magnitud de la corriente del rayo varía aleatoriamente de acuerdo a la curva probabilística de distribución del rayo. Estas descargas pueden incidir sobre los conductores de fase, los cables de guarda o las estructuras.

Las descargas a los conductores de fase pueden presentarse bajo dos condiciones:

- Que la línea no cuente con blindaje con cables de guarda
- Que el blindaje que proporciona los cables de guarda sea deficiente

Las líneas de transmisión normalmente están protegidas por cables de guarda, lo cual no ocurre con las redes de distribución, por lo que una descarga a la línea de transmisión obedece a una violación de la zona de protección de los cables de guarda. Esta zona de protección normalmente no es considerada en la torre o estructura sino que se evalúa en el punto medio del claro entre dos torres. Para establecer una relación del blindaje del cable de guarda y los conductores de fase se debe tomar en cuenta las flechas de estos dos elementos en el punto medio del claro.

---

---

La flecha provoca un cambio en la posición relativa entre los conductores de fase y los cables de guarda, este cambio debe incorporarse para efectos del cálculo de la tensión inducida. Esto se hace a través del concepto de la impedancia característica del conductor de fase, que está afectada por la geometría de los conductores de fase y cables de guarda. Con la expresión A.5, se determina la impedancia de los cables de fase, [31].

$$Z_c = 60 \ln \frac{2h}{r_c} \quad (\text{A.5})$$

Donde :

$h$  : Altura equivalente de los conductores de fase [m]

$r_c$  : Radio del conductor de fase [m]

La altura equivalente se calcula para tres tipos de terreno que son factibles para la construcción de una línea de transmisión, como se indica en las ecuaciones A.6, A.7, A.8.

- Terreno Plano

$$h = hc - \frac{2}{3} f \quad (\text{A.6})$$

- Terreno ondulado

$$h = hc \quad (\text{A.7})$$

- Terreno montañoso

$$h = 2hc \quad (\text{A.8})$$

Donde :

$hc$  : Altura del conductor de fase en la torre [m]

$f$  : Flecha de los conductores de fase en el punto medio del claro [m]

El valor de la flecha puede estimarse para claros de hasta 400 m como el 1 o 2 % del claro, como se indica en la ecuación A.9.

$$f = (1 - 2\%) \text{claro} \quad (\text{A.9})$$

Cuando incide una descarga atmosférica sobre los conductores de fase, la magnitud de la corriente de rayo y la impedancia de los conductores de fase, hacen que aparezca una onda de voltaje sobre los conductores de fase y la magnitud del voltaje inducido tiene una magnitud que se determina como lo indica la ecuación A.10.

$$v_c = \frac{ZcI}{2} \quad (\text{A.10})$$

Donde :

$Z_c$  : Impedancia de los cables de fase [ $\Omega$ ]

$I$  : Magnitud de la corriente del rayo [kA]

$v_c$  : Voltaje inducido sobre los conductores de fase [kV]

Lo anterior se describe en la figura A.3.

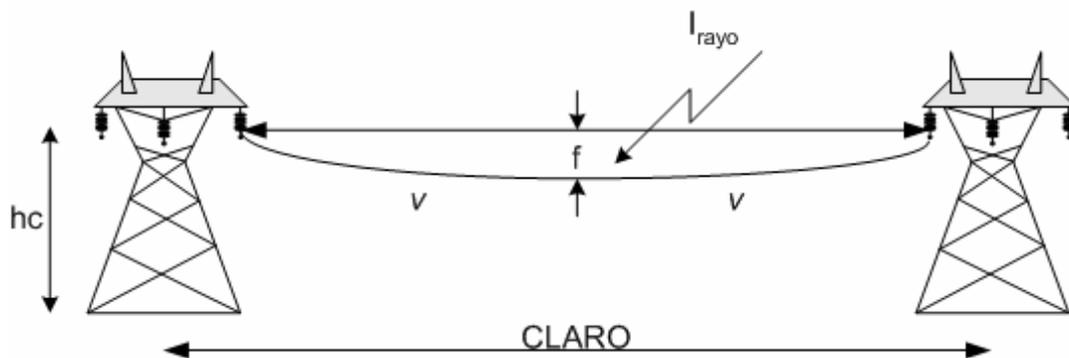


Figura A.3. Voltaje inducido sobre los conductores de fase.

#### A.6. DESCARGA A LOS CABLES DE GUARDA.

La función de los cables de guarda es evitar que se presenten descargas atmosféricas directas sobre los conductores de fase. Cuando una descarga incide sobre un cable de guarda y por estar estos aterrizados por medio de las estructuras se conduce a tierra, lo que implica incorporar el efecto del terreno, con un concepto denominado resistencia al pie de la torre ( $R_T$ ).

Por otro lado cuando se hace presente una descarga en los cables de guarda, además de conducir la corriente al suelo, provoca que aparezca un voltaje en los conductores de fase por inducción. El voltaje inducido en los conductores de fase se determina a partir de un factor de acoplamiento entre el valor instantáneo de voltaje inducido en los cables de guarda sobre los conductores de fase.

El coeficiente de acoplamiento se determina considerando el efecto de una diferencia de potencial del cable de guarda a tierra y con respecto a los conductores de fase. Para esto se supone que en un instante se comportan como cargas electrostáticas con un potencial y se puede usar el método de las imágenes donde se considera que el suelo es un espejo, como se muestra en la figura A.4.

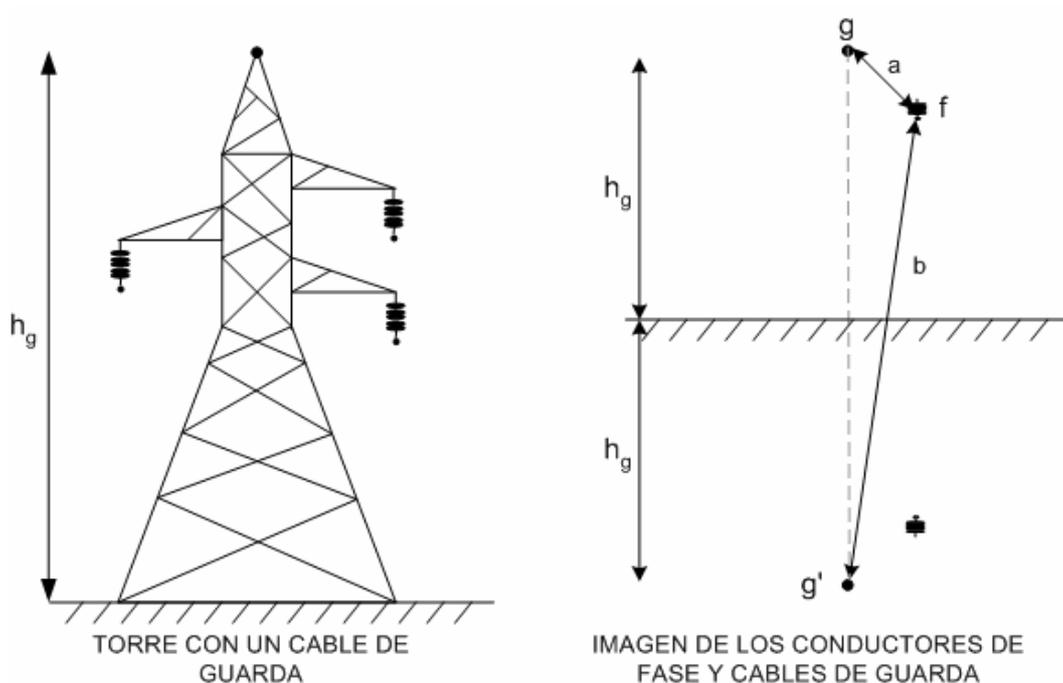


Figura A.4. Método de las imágenes para determinar el coeficiente de acoplamiento.

Donde :

$h_g$  : Altura de los cables de guarda en la torre [m]

$g$  : Cable de guarda

$f$  : Conductor de fase

$g'$ : Imagen del cable de guarda

Como se puede observar, el coeficiente de acoplamiento depende finalmente de la geometría de la línea y se determina con la expresión A.11.

$$Ca = \frac{\log \frac{a}{b}}{\log \frac{2h_g}{r_g}} \quad (\text{A.11})$$

Donde :

Ca : Coeficiente de acoplamiento

a : Distancia del cable de guarda al conductor de fase [m]

b : Distancia entre el conductor de fase y la imagen del cable de guarda [m]

r<sub>g</sub> : Radio del cable de guarda [m]

Finalmente, el voltaje inducido sobre los conductores de fase cuando se induce una descarga sobre los cables de guarda, se determina con la expresión A.12.

$$v_{ci} = Cav_g \quad (\text{A.12})$$

Donde :

v<sub>ci</sub> : Voltaje inducido sobre el conductor de fase [kV]

v<sub>g</sub> : Voltaje que aparece en el cable de guarda [kV]

El voltaje que aparece en el cable de guarda cuando una descarga incide sobre él, se determina con la expresión A.13.

$$v_g = \frac{ZgI}{2} \quad (\text{A.13})$$

Donde :

I : Magnitud de la corriente del rayo [kA]

Zg : Impedancia del cable de guarda [Ω], que se determina como :

$$Zg = 60In \frac{2\bar{h}_g}{r_g} \quad (\text{A.14})$$

Donde :

$\bar{h}_g$  : Altura equivalente de los cables de guarda [m]

r<sub>g</sub> : Radio del cable de guarda [m]

La altura equivalente de los conductores de guarda se determina de la misma forma que para los conductores de fase, es decir se considera el tipo de terreno en que está construida la línea y el claro entre torres.

Para el caso de una torre o una línea con dos cables de guarda como se indica en la figura A.5, el coeficiente de acoplamiento se determina de la misma manera que para el caso de un solo cable de guarda, quedando la expresión para el coeficiente de acoplamiento como se indica en la ecuación A.15.

$$Ca = \frac{\log \sqrt{\frac{b_1 b_2}{a_1 a_2}}}{\log \frac{2h_g}{r_{eq}}} \quad (A.15)$$

Donde :

$a_1, a_2, b_1, b_2$  : Distancias entre los cables de guarda y sus imágenes respecto al conductor de fase [m]

$r_{eq}$  : Radio equivalente de los cables de guarda [m]

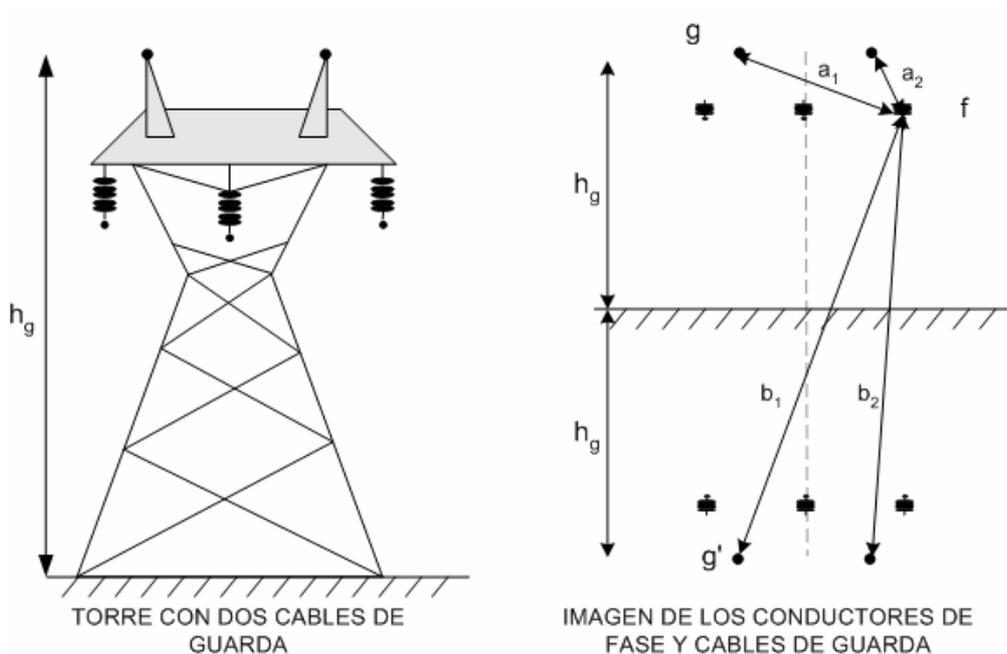


Figura A.5. Método de las imágenes para determinar el coeficiente de acoplamiento para dos cables de guarda.

El radio equivalente de los cables de guarda se determina con la ecuación A.16.

---

---

$$r_{eq} = \sqrt{ar_g} \quad (A.16)$$

Donde :

a : Distancia de separación de los cables de guarda [m]

#### **A.7. DESCARGA A LAS ESTRUCTURAS O TORRES.**

La probabilidad de descarga en una torre o estructura es baja, debido a que ocupa una extensión territorial pequeña a comparación de la línea de transmisión, sin embargo por tratarse de una saliente del terreno representa un punto de conexión de cargas electrostáticas que son susceptibles al impacto del rayo.

La descarga atmosférica en la torre representa un potencial entre la punta de la torre y el suelo, suponiendo que la corriente del rayo se transmite en su totalidad a través de la torre.

Cuando la descarga incide sobre los cables de guarda o las estructuras o torres, la corriente del rayo se conduce a tierra a través de las torres. Esta corriente se debe disipar en el terreno, para evitar problemas de reflexión de onda de voltaje que se presenta cuando la resistencia al pie de la torre es alta. En este caso, la onda de voltaje se refleja y se superpone con la onda incidente, apareciendo un voltaje mayor que el incidente en la cadena de aisladores que puede dar lugar a la ruptura dieléctrica por flameo que se conoce como flameo inverso (back - Flashover).

Para reducir la probabilidad de flameo inverso en las líneas de transmisión, se debe tener un valor de “ $R_T$ ” bajo para evitar la reflexión de onda de voltaje. En la práctica el valor de la  $R_T$  debe estar en el rango de 10 – 15 ohms. Este valor depende de:

- Resistividad del terreno
- Tipo y diseño de la red de tierras

La resistividad del terreno depende de las características del suelo y el tipo de tierra, en la tabla A.1, se dan algunos valores de referencia para resistividades del terreno.

Tabla A.1. Resistividades de terrenos.

<b>CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO</b>	<b>TIPO DE TIERRA</b>	<b>R(<math>\Omega</math> - m)</b>
<i>TERRENO HÚMEDO</i>	Terreno de cultivo	10 - 100
<i>TERRENO DE CULTIVO</i> <i>TERRENO ARCILLOSO</i>	Terreno seco	100 – 1000
<i>ROCA TIPO SÓLIDO</i>	Terreno rocoso	$10^3 - 10^6$
<i>ROCA VULCANIZADA</i>	Roca	$10^8$

Por otro lado, la red de tierras para una línea de transmisión se puede diseñar en base a dos criterios dependiendo de la naturaleza del terreno.

- Red de tierras con electrodos
- Red de tierras a base de contra-antenas

Cuando se trata de una red de tierras con electrodos, generalmente se trata de terrenos con baja resistividad con un valor menor a  $100 \Omega - m$ , esto se debe a que la aplicación de electrodos no reduce sensiblemente la resistencia al pie de la torre en terrenos altamente resistivos. Para esto se emplean contra – antenas que a diferencia de los electrodos sí reducen sensiblemente la resistividad.

El valor de la resistencia al pie de la torre puede ser medida directamente en sitio donde se localice cada torre.

Para determinar el voltaje que aparece en la punta de la torre y el suelo o bien el que aparece en la cadena de aisladores y que es el que puede producir fallas ya sea por descarga directa o por flameo inverso, se usa un modelo que incorpora las inductancias de las mismas, la resistencia al pie de la torre y su distribución de la corriente en los cables de guarda, esto se muestra en la figura A.6, donde:

L : Inductancia de la torre [ $\mu H$ ]

$R_T$  : Resistencia al pie de la torre [ $\Omega$ ]

$Z_g$  : Impedancia de los cables de guarda [ $\Omega$ ]

$Z_{eg}$  : Impedancia equivalente de los cables de guarda [ $\Omega$ ], donde :

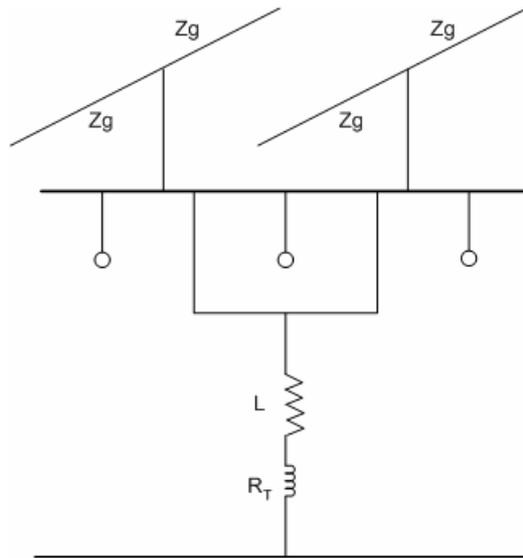


Figura A.6. Modelo para determinar el voltaje en la punta de la torre.

Para la inductancia de la torre se toma un valor de  $20 \mu\text{H}$  para estructuras de hasta 40 m de alto.

Primero, se evalúa el voltaje reflejado del suelo a la torre, considerando la resistencia al pie de la torre y la impedancia equivalente de los cables de guarda como lo indica la ecuación A.18.

$$V_r = \tau * L * \frac{di}{dt} \quad (\text{A.17})$$

Donde :

$V_r$  : Voltaje reflejado[kV]

$\tau$  : Coeficiente de reflexión

$\frac{di}{dt}$  : Índice de elevación de corriente[40 kA/ $\mu\text{s}$ ]

$$\tau = \frac{Z - R_T}{R_T + Z} \quad (\text{A.18})$$

Si el rayo incide sobre los cables de guarda, recordando que la corriente que circula a través de éstos induce un voltaje sobre los conductores de fase, que se describe por medio de un coeficiente de acoplamiento y adicionalmente los cables de guarda y la resistencia al pie de la torre, forman un circuito paralelo a través del cual circula la corriente del rayo.

También cuando la onda del rayo incide, está presente la onda de voltaje senoidal de la línea de manera que esta onda se superpone a la del rayo. Con estas consideraciones el voltaje que aparece en la cadena de aisladores en el momento de la descarga se puede determinar como la expresión A.19.

$$V_{ais} = \frac{R_T Z}{R_T + Z} I - Ca \frac{R_T Z}{R_T + Z} I + \frac{Z - R_T}{R_T + Z} L \frac{di}{dt} - Ca \frac{Z - R_T}{R_T + Z} L \frac{di}{dt} \pm V_{pf} \quad (A.19)$$

Donde :

$V_{pf}$  : Voltaje pico de la onda senoidal del sistema [kV]

$Ca$  : Coeficiente de acoplamiento

## A.8. ÍNDICE DE ATRACCIÓN DE RAYOS.

Cuando se construye una línea de transmisión se debe de decidir cual debe ser la trayectoria a seguir basada en estudios topográficos y de disponibilidad de terreno para su construcción, lo que implica influir en la exposición de la línea a la acción del rayo, la tasa o índice de atracción de rayos a las estructuras y cables de guarda, así como el valor de la resistencia al pie de la torre.

La exposición de la línea a descargas atmosféricas se ve influenciada por la densidad de rayos a tierra. La altura de las torres determina la cantidad de rayos que puede atraer la línea y que se puede estimar con la expresión A.20, [45], [46].

$$N_s = N_g \left( \frac{28h^{0.6} + b}{10} \right) \quad (A.20)$$

Donde :

$h$  : Altura de la torre [m]

$b$  : Separación entre los cables de guarda [m]

$N_g$  : Densidad de rayos a tierra

$N_s$  : Número de rayos que inciden por 100 km al año

Cuando la descarga atmosférica impacta directamente a los conductores de fase se incrementa la probabilidad de flameo, para reducir esta probabilidad de falla se emplean los cables de guarda. Suponiendo que la resistencia al pie de la torre es lo

suficientemente pequeña como para que no se produzca reflexión de la onda incidente de voltaje, entonces el impacto a los conductores de fase depende básicamente del ángulo de blindaje.

### A.9. MÉTODO ELECTRO-GEOMÉTRICO.

En las líneas de transmisión normalmente el ángulo de blindaje no satisface plenamente las expectativas de protección a los conductores de fase contra las descargas atmosféricas. Se ha desarrollado un método que se basa en el concepto de distancia de atracción, que se considera igual para los conductores de fase y los cables de guarda y dependiendo de la altura media de los conductores sobre el suelo se determina la distancia de atracción de rayo de la línea, que se determina por la expresión A.21, [47], [33].

$$rc = 10I^{0.65} \quad (\text{A.21})$$

Donde :

rc : Distancia de atracción [m]

La altura media de los conductores sobre el suelo se determina con la expresión A.22.

$$rg = \begin{cases} [13.6 + 1.7 \log(43 - yc)] I^{0.65} \rightarrow yc < 40m \\ 5.5 I^{0.65} \rightarrow yc \geq 40m \end{cases} \quad (\text{A.22})$$

Donde: yc: Altura media de los conductores [m]

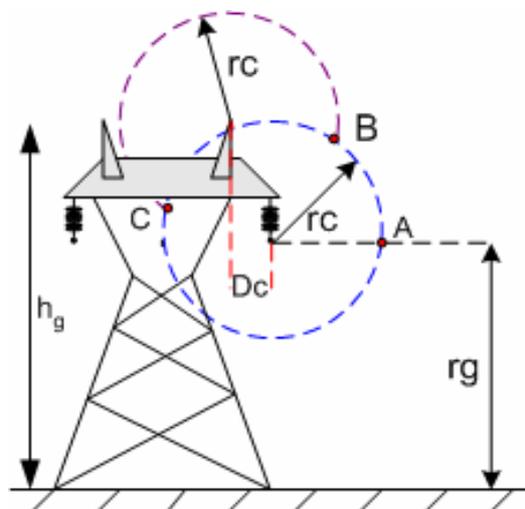


Figura A.7. Método electrogeométrico.

---

---

De la figura A.7, se puede decir, que si la corriente del rayo impacta el arco A-B, entonces se dice que el rayo impacta al conductor de fase. Si el rayo impacta el arco B-C, entonces la descarga incide sobre el cable de guarda. Si la corriente obedece un modelo probabilístico, entonces los valores que inciden sobre los arcos A-B y B-C corresponden a la misma distribución, por lo que se trata de determinar el número de veces que el rayo viola la zona de protección de los cables de guarda. Para que el blindaje funciones se deben de cumplir las siguientes condiciones:

- Sí el punto de corte B queda fuera de la zona Dc y por arriba de  $h_g$
- Sí  $r_g$  es mayor a  $h_g$  no hay rayos incidentes en la torre.

Si alguna de las dos condiciones anteriores no se cumple, implica que el blindaje falla y se presentará una descarga en los conductores de fase.





```

CALL AJUSTE(8,NP)
END SUBROUTINE ACUMUL

SUBROUTINE AJUSTE(IGRAD,NP)
IMPLICIT NONE
COMMON/C1/Y,X,COEF
COMMON/A
REAL,DIMENSION(50):: RES,Z,SUMA,X,Y,COEF
REAL,DIMENSION(50,51):: A
INTEGER::IGRAD, L, LL, KK, M, I, J, II, NN, K,N
REAL*8::ERROR,NP
!* SUBROUTINA PARA EJUSTAR UN CONJUNTO DE DATOS A UN
POLINOMIO DE GRADO I GRAD POR MINIMOS CUADRADOS
WRITE(*,20)
20 FORMAT(1H1,///10X,'AJUSTE DE LA PROBABILIDAD A UN
POLINOMIO
DE OCTAVO GRADO',/)
L=1+2*IGRAD
KK=1+IGRAD
LL=2+IGRAD
DO J=1,L
SUMA(J)=0.0
RES(J)=0.0
END DO
SUMA(1)=NP
DO NN=1,NP
RES(1)=RES(1)+Y(NN)
END DO
DO I=2,L
M=I-1
DO K=1,NP
SUMA(I)=SUMA(I)+X(K)**M
RES(I)=RES(I)+Y(K)*X(K)**M
END DO
END DO
DO I=1,KK
A(I,KK+1)= RES(I)
II=I
DO J=1,KK
A(I,J)=SUMA(II)
II=II+1
END DO
END DO
!* SE LLAMA A LA SUMRUTINA GAUSS PARA CALCULAR LOS
COEFICIENTES DEL POLINOMIO  *!
CALL GAUSS(KK,LL)
LL=0
DO L=1,NP !TERMINA EN 6
Z(L)=0.0
IF(X(L).EQ.0.0)GOTO 7
DO LL=1,KK
Z(L)=Z(L)+COEF(LL)*(X(L)**(LL-1))
END DO
GOTO 6
7 Z(L)=COEF(1)
6 END DO
DO I=1,NP
ERROR=ERROR+(Y(I)-Z(I))**2
END DO
WRITE(*,10)
10 FORMAT(///10X,'RESULTADOS DEL AJUSTE'///10X,'VALOR DE V
PROB. ACUM.
REAL Q PROB ACUM. Q CALCULADA')
WRITE(16,110)
110 FORMAT(///10X,'RESULTADOS DEL AJUSTE'///10X,'VALOR DE V
PROB. ACUM.
REAL Q PROB ACUM. Q CALCULADA')
DO I=1,NP
WRITE(*,12)X(I),Y(I),Z(I)
12 FORMAT(11X,G10.4,2X,9('-'),2X,G10.4,2X,16('-'),2X,G10.4,/)
WRITE(16,120)X(I),Y(I),Z(I)
120 FORMAT(11X,G10.4,2X,9('-'),2X,G10.4,2X,16('-'),2X,G10.4,/)
END DO
WRITE(*,13)ERROR
13 FORMAT(///10X,'ERROR EN EL AJUSTE=',G12.6)

```

```

WRITE(16,130)ERROR
130 FORMAT(///10X,'ERROR EN EL AJUSTE=',G12.6)

WRITE(*,5)(COEF(I),I=1,KK)
5 FORMAT(///10X,'POLINOMIO DADO POR EL
AJUSTE=',/5X,G10.4,'+ <',
G10.4,'>X+ <',G10.4,'>X**2 + <',G10.4,'>X**3 + <',G10.4,
'>X**4',/10X,' + <',G10.4,'>X**5 + <',G10.4,'>X**6 + <',
G10.4,'>X**7 + <',G10.4,'>X**8')
WRITE(16,50)(COEF(I),I=1,KK)
50 FORMAT(///10X,'POLINOMIO DADO POR EL
AJUSTE=',/5X,G10.4,'+ <',
G10.4,'>X+ <',G10.4,'>X**2 + <',G10.4,'>X**3 + <',G10.4,
'>X**4',/10X,' + <',G10.4,'>X**5 + <',G10.4,'>X**6 + <',
G10.4,'>X**7 + <',G10.4,'>X**8')
END SUBROUTINE AJUSTE

SUBROUTINE FUNCION (X,XDX,F1,F2,F3,X1)
IMPLICIT NONE
REAL*8::XDX,X,F1,F2,X1,F3
F1=0.398942284*EXP(-0.5*(X**2))
F2=0.398942284*EXP(-0.5*(XDX**2))
F3=0.398942284*EXP(-0.5*(X1**2))
END SUBROUTINE

SUBROUTINE GAUSS(N,M)
IMPLICIT NONE
COMMON/C1/FA,V,X
COMMON/A
REAL,DIMENSION(50):: FA,V,X
REAL,DIMENSION(50,51)::A
INTEGER:: L, KK, M, I, J, II, NN, K, N, JJ
REAL*8::TEMP,COC,BIG,GRAN,SUM
!* SUBROUTINA PARA RESOLVER UN SISTEMA DE EC POR EL
METODO DE GAUSS  *!  *!
!SE CAMBIA N Y M OR KK LL
L=N-1
DO K=1,L
JJ = K
BIG= ABS(A(K,K))
KK=K+1
DO I=KK,N
GRAN=ABS(A(I,K))
IF (BIG.GE.GRAN)GOTO 2
BIG = GRAN
JJ=I
2 END DO
IF (JJ.EQ.K)GOTO 3
DO J=K,M
TEMP=A(JJ,J)
A(JJ,J)=A(K,J)
A(K,J)=TEMP
END DO
3 DO I=KK,N
COC=A(I,K)/A(K,K)
DO J=KK,M
A(I,J)=A(I,J)-COC*A(K,J)
END DO
END DO
DO I=KK,N
A(I,K)=0.0
END DO
END DO
X(N)=A(N,M)/A(N,N)
DO NN=1,L
SUM=0.0
I=N-NN
II=I+1
DO J=II,N
SUM=SUM+A(I,J)*X(J)
END DO
X(I)=(A(I,M)-SUM)/A(I,I)
END DO
RETURN
END SUBROUTINE GAUSS

```

# APÉNDICE C: PROGRAMA PARA EVALUAR EL EFECTO DE LA HUMEDAD SOBRE LA TENSION CRÍTICA DE FLAMEO EN AISLADORES CONTAMINADOS.

```

PROGRAM humedad
!*Programa para el calculo de la tension crítica de flameo V50% en función
de la densidad equivalente de sal depositada y del grado de humedad
DESD -- DENSIDAD EQUIVALENTE DE SAL DEPOSITADA
EI -- DENSIDAD DE DEPOSITO DE SAL INICIAL
AESD -- INCREMENTOS DE DEPOSITO DE SAL
KH - KW -- CONSTANTES DE LOS AISLADORES
RH -- HUMEDAD RELATIVA
MI -- DENSIDAD DE ABSORCION DE HUMEDAD
M0 -- DENSIDAD DE ABSORCION SATURADA DE HUMEDAD
H -- GRADO DE HUMEDAD
vv50 -- TENSION CRÍTICA DE FLAMEO
IMPLICIT NONE
REAL,DIMENSION(50):: DESD,time ,A, timei,B,C
REAL,DIMENSION(50):: O, OO, vv50 , H, M0, RH, MI
INTEGER::N,I,k,t
REAL*8::EI, AESD,rhmas,xtes,bb
REAL*8:: KH,KW, tmas,L,LL
CHARACTER(LEN=20):: ARCH
WRITE(6,18)
18 FORMAT(/,5X,'Escriba el nombre del archivo de RES: ', $)
READ(5,10)ARCH
OPEN(16,FILE=ARCH)
WRITE(6,1)
1 FORMAT(5X,'Programa para el calculo del voltaje de flameo V50% ')
WRITE(6,2)
2 FORMAT(5X,'En funcion de la HUMEDAD y de la DESD')
WRITE(6,3)
3 FORMAT(/,5X,'NUMERO DE V50 A CALCULAR =', $)
READ (5,*)N
WRITE(6,8)
8 FORMAT(/,5X,'DENSIDAD DE DEPOSITOS DE SAL INICIAL =', $)
READ (5,*)EI
WRITE(6,9)
9 FORMAT(/,5X,'INCREMENTOS DE DEPOSITO DE SAL =', $)
READ (5,*)AESD
KH= 915.0
KW= 106.0
L = 0.0
time (I) = L
LL = 75.0
RH(I) = LL
WRITE(16,*)CONSTANTES KH Y KW'
WRITE(16,200)
200 FORMAT(6X,'KH',14X,'KW')
WRITE(16,201)KH,KW
201 FORMAT(3X,F8.3,7X,F8.3)
DO I=1, N+1
IF(I.EQ.1)GOTO 101
DESD(I) = DESD(I-1)+AESD
GOTO 100
101 DESD(I)=EI
100 END DO
time(0) = 0
DO I = 1, N+1
DESD(I)=0.2
k = 10
END DO
WRITE(16,*)'*****'
WRITE(16,*) DENSIDAD EQUIVALENTE DE SAL DEPOSITADA '
WRITE(16,3000)
3000 FORMAT(6X,'DESD')
WRITE(16,*)'*****'
DO I=1, N+1
WRITE(16,3001) DESD(I)
3001 FORMAT(3X,F8.4)
END DO
DO I = 1, N+1

tmas = 3.0
time(I+1) = time(I) + tmas
END DO
WRITE(16,*)TIEMPO (SEGUNDOS)'
WRITE(16,400)
400 FORMAT(6X,'time')
DO I=1,N
WRITE(16,223)time(I)
END DO
WRITE(16,*)'*****'
LL = 75.0
DO I = 1, N+1
RH(I) = 0
rhmas = 1.25
RH(I+1) = 75 + (I*rhmas)
RH(I) = 90.0
END DO
WRITE(16,*)'HUMEDAD RELATIVA (%)'
WRITE(16,401)
401 FORMAT(6X,'RH')
DO I=1,N
WRITE(16,423) RH(I)
423 FORMAT(3X,F8.4)
END DO
DO I=1, N+1
RH(I) = 90.0
A(I)= 2.0*TAN(62.5)
B(I)= (TAN((RH(I) - 75.0)*5.0 - 62.5) + TAN(62.5))/(A(I))
M0(I)=((TAN((RH(I)-75.0)*5.0 - 62.5)+TAN(62.5))/A(I))*DESD(I)*10.0
C(I) = B(I)*10.0
M0(I) = 2
M0(I) = C(I)*DESD(I)
MI(I) =ATAN(time(I)/10.0)/(3.1416/2.0)*M0(I)
END DO
WRITE(16,*)'DENSIDAD DE ABSORCION SATURADA DE
WRITE(16,801)
801 FORMAT(6X,'M0(I)')
DO I=1,N
WRITE(16,823) M0(I)
823 FORMAT(3X,F8.4)
END DO
WRITE(16,*)'DENSIDAD DE ABSORCION DE HUMEDAD'
WRITE(16,901)
901 FORMAT(6X,'MI(I)')
DO I=1,N
WRITE(16,923) MI(I)
923 FORMAT(3X,F8.4)
END DO
DO I = 1, N+1
H(I) = ((ATAN(M0(I)/((5.0*DESD(I))-1.0)*TAN(62.5))+62.5)/5.0)+75.0
H(I) = 0.0 + (I*5)
H(I) = I*0.5
OO(I) = (KW*(DESD(I)**-0.2))* ((1.0/ (1.0+EXP(-(H(I)-75.0))))))
O (I) = 915*(1-(1/(1+exp(-(H(I)-75))))))
OO(I) = 106*(DESD(I)**-0.2)*(1/(1+exp(-(H(I)-75))))
vv50(I) =O(I) + OO(I)
END DO
WRITE(16,*)'GRADO DE HUMEDAD'
DO I=1,N
WRITE(16,733)H(I)
733 FORMAT(10X,F25.4,10X,F25.6)
END DO
WRITE(16,*)'TENSION CRUTICA DE FLAMEO'
DO I=1,N
WRITE(16,723)vv50(I)
723 FORMAT(10X,F25.4,10X,F25.6)
END DO
END PROGRAM humedad

```



---

```
59 FORMAT(/,5X,'32SPC111 ----- 3')
READ (5,*)TA
WRITE(6,*)'*****'
***'
IF (TA .EQ. 1) THEN
Dcat = 292.0
ELSE IF (TA .EQ. 2) THEN
Dcat = 445.0
ELSE IF (TA .EQ. 3) THEN
Dcat = 612.0
END IF
WRITE(16,60)
60 FORMAT(2X,'LA DISTANCIA DE FUGA SEGUN EL TIPO DE
AISLADOR:',$)
WRITE(16,61)Dcat
WRITE(16,*)'mm'
61 FORMAT(5X,F8.3)
NA = Dftc / Dcat
WRITE(16,62)
62 FORMAT(2X,'NUMERO DE AISLADORES DE LA CADENA:',$)
WRITE(16,63)NA
63 FORMAT(5X,F8.3)
WRITE(16,*)'*****'
***'
END PROGRAM
```

## APÉNDICE E: ARCHIVOS DE ENTRADA SALIDA DE LOS PROGRAMAS EN FORTRAN.

**PROGRAMA PARA DETERMINAR LA PROBABILIDAD ACUMULATIVA DE FALLA EN CADENAS DE AISLADORES EN PARALELO POR EFECTO DE LA CONTAMINACIÓN**  
**ARCHIVO DE ENTRADA:**

Escriba el nombre del archivo de RES: alten.res  
 Programa para el calculo del voltaje de flameo V50%  
 Y la desviación estandar SIG(DESD)

NUMERO DE V50 A CALCULAR =31

VOLTAJE INICIAL SELECCIONADO =12

INCREMENTOS DE VOLTAJE =0.5

DENSIDAD DE DEPOSITOS DE SAL INICIAL =0.02

INCREMENTOS DE DEPOSITO DE SAL =0.02

NUMERO DE NIVELES DE VOLTAJE APLICADOS =30

TRAMO DE CADA INTERVALO =0.01

NO. DE SECCIONES QUE SE DIVIDE CADA SUBINTEVALO=10

NO. DE CAD DE AISLADORES EN PARALELO N1=100  
 NO. DE CAD DE AISLADORES EN PARALELO N2=200

**ARCHIVO DE SALIDA:**

**CALCULO DE V50 Y DE SIGMA PARA CADA DESD**

\*\*\*\*\*

DESD	V50	SIG
0.020000	13.964	0.17700
0.040000	12.930	0.31300
0.060000	11.973	0.53300
0.080000	11.087	0.83700
0.100000	10.266	1.22500
0.120000	9.5059	1.6970
0.140000	8.8022	2.2530
0.160000	8.1506	2.8930
0.180000	7.5473	3.6170
0.200000	6.9886	4.4250
0.220000	6.4712	5.3170
0.240000	5.9922	6.2930
0.260000	5.5486	7.3530
0.280000	5.1379	8.4970
0.300000	4.7575	9.7250
0.320000	4.4054	11.037
0.340000	4.0793	12.433
0.360000	3.7773	13.913
0.380000	3.4977	15.477
0.400000	3.2387	17.125
0.420000	2.9990	18.857
0.440000	2.7770	20.673
0.460000	2.5714	22.573
0.480000	2.3811	24.557
0.500000	2.2048	26.625
0.520000	2.0416	28.777
0.540000	1.8905	31.013
0.560000	1.7505	33.333
0.580000	1.6209	35.737
0.600000	1.5009	38.225
0.620000	1.3898	40.797

\*\*\*\*\*

**CALCULO DE V0 DE I HASTA M**

\*\*\*\*\*

V0	I	M
12.0000	1	30
12.5000	2	30
13.0000	3	30
13.5000	4	30
14.0000	5	30
14.5000	6	30
15.0000	7	30
15.5000	8	30
16.0000	9	30
16.5000	10	30
17.0000	11	30
17.5000	12	30
18.0000	13	30
18.5000	14	30
19.0000	15	30
19.5000	16	30
20.0000	17	30
20.5000	18	30
21.0000	19	30
21.5000	20	30
22.0000	21	30
22.5000	22	30
23.0000	23	30
23.5000	24	30
24.0000	25	30
24.5000	26	30
25.0000	27	30
25.5000	28	30
26.0000	29	30

\*\*\*\*\*

**CALCULO DE VARIABLES NORMALIZADAS XN**

\*\*\*\*\*

XN	I
.7447	1
.7961	2
.8476	3
.8990	4
.9504	5
1.0018	6
1.0532	7
1.1046	8
1.1560	9
1.2074	10
1.2589	11
1.3103	12
1.3617	13
1.4131	14
1.4645	15
1.5159	16
1.5673	17
1.6188	18
1.6702	19
1.7216	20
1.7730	21
1.8244	22
1.8758	23
1.9272	24
1.9787	25
2.0301	26
2.0815	27
2.1329	28
2.1843	29

\*\*\*\*\*

**ORDENAR LAS VARIABLES NORMALIZADAS DE MENOR A MAYOR**

\*\*\*\*\*

Z

\*\*\*\*\*

.7447  
.7961  
.8476  
.8990  
.9504  
1.0018  
1.0532  
1.1046  
1.1560  
1.2074  
1.2589  
1.3103  
1.3617  
1.4131  
1.4645  
1.5159  
1.5673  
1.6188  
1.6702  
1.7216  
1.7730  
1.8244  
1.8758  
1.9272  
1.9787  
2.0301  
2.0815  
2.1329

.5593E-01 ----- .2252E-01 ----- .1247E-01  
.5631E-01 ----- .2352E-01 ----- .1248E-01  
.5669E-01 ----- .2451E-01 ----- .1249E-01  
1.685 ----- .2549E-01 ----- .3061E-01  
1.695 ----- .2644E-01 ----- .3098E-01  
1.705 ----- .2738E-01 ----- .3135E-01  
1.715 ----- .2831E-01 ----- .3174E-01  
1.725 ----- .2922E-01 ----- .3213E-01  
1.735 ----- .3011E-01 ----- .3253E-01  
1.745 ----- .3099E-01 ----- .3294E-01  
1.755 ----- .3186E-01 ----- .3336E-01  
1.765 ----- .3270E-01 ----- .3379E-01  
1.775 ----- .3354E-01 ----- .3423E-01  
1.785 ----- .3436E-01 ----- .3468E-01  
1.795 ----- .3516E-01 ----- .3514E-01  
1.805 ----- .3595E-01 ----- .3561E-01  
1.815 ----- .3673E-01 ----- .3609E-01  
1.825 ----- .3749E-01 ----- .3657E-01  
1.835 ----- .3824E-01 ----- .3707E-01  
1.845 ----- .3897E-01 ----- .3758E-01  
1.855 ----- .3969E-01 ----- .3810E-01  
1.865 ----- .4040E-01 ----- .3863E-01  
1.875 ----- .4110E-01 ----- .3917E-01  
1.885 ----- .4178E-01 ----- .3972E-01  
1.895 ----- .4245E-01 ----- .4028E-01  
1.905 ----- .4310E-01 ----- .4085E-01  
1.915 ----- .4375E-01 ----- .4143E-01  
1.925 ----- .4438E-01 ----- .4202E-01  
1.935 ----- .4500E-01 ----- .4263E-01  
1.945 ----- .4561E-01 ----- .4324E-01  
1.955 ----- .4621E-01 ----- .4387E-01  
.1061E-01 ----- .4679E-01 ----- -.6264E-02  
.3553E-01 ----- .4736E-01 ----- .1809E+09  
-.4257E-01 ----- .4793E-01 ----- .9018E-02  
.1693E-01 ----- .4848E-01 ----- .1120E-01  
2.005 ----- .4902E-01 ----- .4717E-01  
2.015 ----- .4955E-01 ----- .4787E-01  
2.025 ----- .5007E-01 ----- .4857E-01

\*\*\*\*\*

RESULTADOS DEL AJUSTE

VALOR DE V PROB. ACUM. REAL Q PROB ACUM. Q  
CALCULADA

.4679E-01 ----- .0000 ----- .1218E-01  
.4736E-01 ----- .1355E-02 ----- .1220E-01  
.4793E-01 ----- .2690E-02 ----- .1222E-01  
.4848E-01 ----- .4006E-02 ----- .1223E-01  
.4902E-01 ----- .5302E-02 ----- .1225E-01  
.4955E-01 ----- .6579E-02 ----- .1227E-01  
.5007E-01 ----- .7837E-02 ----- .1228E-01  
.5058E-01 ----- .9075E-02 ----- .1230E-01  
.5107E-01 ----- .1029E-01 ----- .1231E-01  
.5156E-01 ----- .1150E-01 ----- .1233E-01  
.5204E-01 ----- .1268E-01 ----- .1235E-01  
.5251E-01 ----- .1384E-01 ----- .1236E-01  
.5297E-01 ----- .1499E-01 ----- .1237E-01  
.5342E-01 ----- .1612E-01 ----- .1239E-01  
.5386E-01 ----- .1723E-01 ----- .1240E-01  
.5429E-01 ----- .1832E-01 ----- .1242E-01  
.5471E-01 ----- .1939E-01 ----- .1243E-01  
.5513E-01 ----- .2045E-01 ----- .1244E-01  
.5553E-01 ----- .2149E-01 ----- .1245E-01

.1815 ----- .3673E-01 ----- .3609E-01  
.1825 ----- .3749E-01 ----- .3657E-01  
.1835 ----- .3824E-01 ----- .3707E-01  
.1845 ----- .3897E-01 ----- .3758E-01  
.1855 ----- .3969E-01 ----- .3810E-01  
.1865 ----- .4040E-01 ----- .3863E-01  
.1875 ----- .4110E-01 ----- .3917E-01  
.1885 ----- .4178E-01 ----- .3972E-01  
.1895 ----- .4245E-01 ----- .4028E-01  
.1905 ----- .4310E-01 ----- .4085E-01  
.1915 ----- .4375E-01 ----- .4143E-01  
.1925 ----- .4438E-01 ----- .4202E-01  
.1935 ----- .4500E-01 ----- .4263E-01  
.1945 ----- .4561E-01 ----- .4324E-01  
.1955 ----- .4621E-01 ----- .4387E-01  
.1061E-01 ----- .4679E-01 ----- -.6264E-02  
.3553E-01 ----- .4736E-01 ----- .1809E+09  
-.4257E-01 ----- .4793E-01 ----- .9018E-02  
.1693E-01 ----- .4848E-01 ----- .1120E-01  
2.005 ----- .4902E-01 ----- .4717E-01  
2.015 ----- .4955E-01 ----- .4787E-01  
2.025 ----- .5007E-01 ----- .4857E-01

2.035	-----	.5058E-01	-----	.4929E-01
2.045	-----	.5107E-01	-----	.5003E-01
2.055	-----	.5156E-01	-----	.5077E-01
2.065	-----	.5204E-01	-----	.5153E-01
2.075	-----	.5251E-01	-----	.5230E-01
2.085	-----	.5297E-01	-----	.5308E-01
2.095	-----	.5342E-01	-----	.5387E-01
2.105	-----	.5386E-01	-----	.5468E-01
2.115	-----	.5429E-01	-----	.5550E-01
2.125	-----	.5471E-01	-----	.5633E-01
2.135	-----	.5513E-01	-----	.5718E-01
2.145	-----	.5553E-01	-----	.5804E-01
2.155	-----	.5593E-01	-----	.5891E-01
2.165	-----	.5631E-01	-----	.5979E-01
2.175	-----	.5669E-01	-----	.6069E-01

**PROGRAMA PARA EVALUAR EL EFECTO DE LA HUMEDAD SOBRE LA TENSION CRITICA DE FLAMEO EN AISLADORES CONTAMINADOS**

AARCHIVO DE SALIDA:

Escriba el nombre del archivo de RES: H.RES

```
WRITE(6,3)
3 FORMAT(//,5X,'NUMERO DE V50 A CALCULAR =',S)
READ (5,*)N
N = 41
```

```
WRITE(6,4)
4 FORMAT(//,5X,'VOLTAJE INICIAL SELECCIONADO =',S)
READ (5,*)V
V=1500.0
```

```
WRITE(6,7)
7 FORMAT(//,5X,'INCREMENTOS DE VOLTAJE =',S)
READ (5,*)AV0
AV0=500.0
```

```
WRITE(6,8)
FORMAT(//,5X,'DENSIDAD DE DEPOSITOS DE SAL INICIAL =',S)
READ (5,*)EI
```

```
WRITE(6,9)
9 FORMAT(//,5X,'INCREMENTOS DE DEPOSITO DE SAL =',S)
READ (5,*)AESD
```

```
WRITE(6,19)
19 FORMAT(//,5X,'NÚMERO DE NIVELES DE VOLTAJE
APLICADOS =',S)
READ (5,*)M
M=40
WRITE(6,11)
11 FORMAT(//,5X,'NIVEL DE HUMEDAD + =',S)
READ (5,*)RH
RH=90
WRITE(6,12)
12 FORMAT(//,5X,'TIEMPO DE EXPOSICION T =',S)
READ (5,*)t
t = 0.01
```

ARCHIVO DE SALIDA:

CONSTANTES KH Y KW

```
*****
KH KW
*****
1580.000 330.000
*****
```

DENSIDAD EQUIVALENTE DE SAL DEPOSITADA

```
*****
DESD
*****
.0200
.0400
.0600
.0800
.1000
.1200
.1400
.1600
.1800
.2000
.2200
.2400
.2600
.2800
.3000
.3200
```

**PROBABILIDAD PARA N CADENAS DE AISLADORES**

\*\*\*\*\*

DESD(I)	FA(I)	P(I)	G(I)
0.020000	0.0000	0.0000	0.0000
0.040000	0.0013551	0.12681	0.23755
0.060000	0.0026905	0.23617	0.41656
0.080000	0.0040061	0.33063	0.55194
0.100000	0.0053022	0.41235	0.65467
0.120000	0.0065790	0.48318	0.73290
0.140000	0.0078365	0.54467	0.79268
0.160000	0.0090751	0.59814	0.83851
0.180000	0.010295	0.64471	0.87377
0.200000	0.011496	0.68533	0.90098
0.220000	0.012678	0.72083	0.92206
0.240000	0.013842	0.75190	0.93844
0.260000	0.014988	0.77913	0.95122
0.280000	0.016116	0.80304	0.96121
0.300000	0.017226	0.82406	0.96905
0.320000	0.018319	0.84258	0.97522
0.340000	0.019394	0.85892	0.98010
0.360000	0.020451	0.87335	0.98396
0.380000	0.021492	0.88612	0.98703
0.400000	0.022515	0.89743	0.98948
0.420000	0.023522	0.90747	0.99144
0.440000	0.024512	0.91640	0.99301
0.460000	0.025485	0.92435	0.99428
0.480000	0.026443	0.93143	0.99530
0.500000	0.027384	0.93775	0.99612
0.520000	0.028309	0.94340	0.99680
0.540000	0.029219	0.94846	0.99734
0.560000	0.030113	0.95300	0.99779
0.580000	0.030992	0.95707	0.99816
0.600000	0.031855	0.96073	0.99846
0.620000	0.032704	0.96403	0.99871
0.640000	0.033537	0.96700	0.99891

\*\*\*\*\*

RF

\*\*\*\*\*

0.2279  
0.2464

\*\*\*\*\*

.3400  
.3600  
.3800  
.4000  
.4200  
.4400  
.4600  
.4800  
.5000  
.5200  
.5400  
.5600  
.5800  
.6000  
.6200  
.6400  
.6600  
.6800  
.7000  
.7200  
.7400  
.7600  
.7800  
.8000  
.8200  
.8400  
\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*  
**TIEMPO (SEGUNDOS)**  
\*\*\*\*\*  
time  
\*\*\*\*\*  
.0000  
3.0000  
6.0000  
9.0000  
12.0000  
15.0000  
18.0000  
21.0000  
24.0000  
27.0000  
30.0000  
33.0000  
36.0000  
39.0000  
42.0000  
45.0000  
48.0000  
51.0000  
54.0000  
57.0000  
60.0000  
63.0000  
66.0000  
69.0000  
72.0000  
75.0000  
78.0000  
81.0000  
84.0000  
87.0000  
90.0000  
93.0000  
96.0000  
99.0000  
102.0000  
105.0000  
108.0000  
111.0000  
114.0000  
117.0000  
120.0000  
\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*  
**HUMEDAD RELATIVA (%)**

\*\*\*\*\*  
**RH**  
\*\*\*\*\*  
90  
\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*  
**DENSAIDAD DE ABSORCION SATURADA DE HUMEDAD**  
\*\*\*\*\*  
**M0(I)**  
\*\*\*\*\*  
.1193  
.2386  
.3579  
.4772  
.5964  
.7157  
.8350  
.9543  
1.0736  
1.1929  
1.3122  
1.4315  
1.5508  
1.6700  
1.7893  
1.9086  
2.0279  
2.1472  
2.2665  
2.3858  
2.5051  
2.6244  
2.7436  
2.8629  
2.9822  
3.1015  
3.2208  
3.3401  
3.4594  
3.5787  
3.6980  
3.8172  
3.9365  
4.0558  
4.1751  
4.2944  
4.4137  
4.5330  
4.6523  
4.7715  
4.8908  
\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*  
**DENSAIDAD DE ABSORCION DE HUMEDAD**  
\*\*\*\*\*  
**MI(I)**  
\*\*\*\*\*  
.0000  
.0443  
.1231  
.2226  
.3326  
.4478  
.5655  
.6843  
.8038  
.9235  
1.0434  
1.1633  
1.2833  
1.4032  
1.5231  
1.6429  
1.7627  
1.8825  
2.0023

2.1220  
 2.2417  
 2.3613  
 2.4810  
 2.6006  
 2.7202  
 2.8398  
 2.9593  
 3.0789  
 3.1984  
 3.3179  
 3.4374  
 3.5569  
 3.6764  
 3.7959  
 3.9153  
 4.0348  
 4.1542  
 4.2737  
 4.3931  
 4.5125  
 4.6320

1580.0000  
 1580.0000  
 1580.0000  
 1580.0000  
 1580.0000  
 1580.0000  
 1579.9480  
 1572.2740  
 999.9229  
 422.2620  
 409.5194  
 404.8124  
 400.4582  
 396.3711  
 392.5221  
 388.8870  
 385.4449  
 382.1780  
 379.0704  
 376.1086  
 373.2804  
 370.5752

\*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*

**GRADO DE HUMEDAD**

\*\*\*\*\*

5.0000  
 10.0000  
 15.0000  
 20.0000  
 25.0000  
 30.0000  
 35.0000  
 40.0000  
 45.0000  
 50.0000  
 55.0000  
 60.0000  
 65.0000  
 70.0000  
 75.0000  
 80.0000  
 85.0000  
 90.0000  
 95.0000  
 100.0000  
 105.0000  
 110.0000  
 115.0000  
 120.0000  
 125.0000  
 130.0000  
 135.0000  
 140.0000  
 145.0000  
 150.0000  
 155.0000  
 160.0000  
 165.0000  
 170.0000  
 175.0000  
 180.0000  
 185.0000  
 190.0000  
 195.0000  
 200.0000  
 205.0000

367.9835  
 365.4969  
 363.1078  
 360.8095  
 358.5958  
 356.4611  
 354.4005  
 352.4094  
 350.4835  
 348.6191  
 346.8127  
 345.0611  
 343.3612

**PROGRAMA PARA CALCULAR LA DISTANCIA DE FUGA, EMPLEANDO AISLADORES TÍPICOS DE LA CFE, BAJO CONDICIONES DE CONTAMINACIÓN**

**ARCHIVO DE ENTRADA:**

Escriba el nombre del archivo de RES: DF.RES  
 PROGRAMA PARA EL CALCULO DE LA DISTANCIA DE FUGA  
 SEGUN EL NIVEL DE CONTAMINACION

EL ESTUDIO SE REALIZA PARA LINEAS EN ALTA TENSION  
 CON NIVELES DE TENSION DE: 115.0, 230.0 Y 400.0 kV

SELECCIONA LA TENSION NOMINAL DEL SISTEMA =400  
 \*\*\*\*\*

NIBEL DE CONTAMINACION =

INDICA EL N0 AL NIBEL DE CONTAMINACION =

LIGERA --- DESD: 0.03 - 0.06 mg/cm\*\*2 ----- 1

MEDIA ----- DESD: 0.10 - 0.20 mg/cm\*\*2 ----- 2

ALTA ----- DESD: 0.30 - 0.60 mg/cm\*\*2 -----3

MUY ALTA--- DESD: > 80 mg/cm\*\*2 ----- 4  
 2

\*\*\*\*\*

INDICA EL FACTOR DE CORRECCION K=

K = 1.0 --- PARA AISLADORES DE SUSPENSION

SI LOS AISLADORES SON TIPO POSTE SE UTILIZA

**TENSION CRUTICA DE FLAMEO**

\*\*\*\*\*

1580.0000  
 1580.0000  
 1580.0000  
 1580.0000  
 1580.0000  
 1580.0000

---

---

K = 1.0 --- Dm < 300 mm

K = 1.1 --- 300 < Dm < 500 mm  
K = 1.1 --- Dm > 500 mm

SIENDO Dm EL DIAMETRO PROMEDIO DEL AISLAMIENTO

mm

1.0

\*\*\*\*\*

SELECCIONA EL TIPO DE AISLADOR

27SVC111 ----- 1

28SV111C ----- 2

32SPC111 ----- 3

Q - IUSA P-2849 -- 4

R - IUSA P-2851 -- 5

S - IUSA P-3000 -- 6

T - IUSA P-3300 -- 7

U - IUSA P-4800 -- 8

V - NGK D 139156-- 9

W - NGK HRAP -- 10

X - NGK DA6900 -- 11

Y - NGK DA8900 -- 12

R

Press any key to continue

ARCHIVO DE SALIDA:

Vn Vmax

\*\*\*\*\*

400.0000 420.0000

\*\*\*\*\*

CONTAMINACION MEDIA CON DESD: 0.10 - 0.20 mg/cm\*\*2

DISTANCIA DE FUGA MINIMA NOMINAL ES: 35 mm/kV

LA DISTANCIA DE FUGA TOTAL DE LA CADENA ES:  
8487.049 mm