

MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DEL EFECTO “FLASHOVER VOLTAGE” EN LOS AISLADORES DE SUSPENSIÓN DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE 500KV, ANTE EL IMPACTO DE LA CAÍDA DE CENIZA DEL VOLCÁN COTOPAXI EN LA ZONA DE MAYOR INFLUENCIA.

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE: INGENIERO EN ELECTROMECÁNICA**

AUTOR: GARCÍAS MEYTHALER, NICOLÁS AGUSTO

DIRECTOR: ING. ÁLVARO, MULLO

2019



Planteamiento del Problema

El uso de nuevas tecnologías para la simulación de elementos Eléctricos o Mecánicos, como son los Software CAD CAE ha venido en aumento y se han vuelto imprescindibles en el desarrollo de la ingeniería moderna, en torno al ambiente eléctrico, estos Software nos permiten simular casos en general de posibles fallas en los Sistemas Eléctricos sean de Generación, Transmisión, Distribución o de Consumo.



100120
Ecuador

ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Objetivo General

Modelar y Simular el efecto “flashover voltage” en los aisladores de suspensión de las líneas de transmisión de 500Kv, mediante simulación estática computacional y matemática, para determinar las condiciones normales y críticas de la caída de ceniza.



Objetivos Específicos

- Realizar un modelamiento matemático y simulación estática del efecto “flashover voltage” de aisladores contaminados con ceniza volcánica, para evitar una posible falla.
- Diseñar un programa que permita visualizar y evaluar el nivel de contaminación del aislador, para poder realizar un mantenimiento preventivo de ser necesario.
- Simular el nivel de contaminación máxima que soporta la cadena de aisladores de 500Kv, en función de la corriente de fuga hasta producirse un “flashover voltaje”.
- Comprobar la Simulación con los datos obtenidos del modelamiento en función de la corriente de fuga.



Hipótesis

Si se desarrolla una simulación y modelo matemático para el análisis de “flashover voltaje” de cadena de aisladores, se podría predecir una posible falla del sistema eléctrico en la línea de transmisión de 500kv por la contaminación con ceniza volcánica.

Variables de Investigación

Variable Independiente: Elaboración de un modelo matemático y simulación para el análisis de “flashover voltage” de cadena de aisladores.

Variable dependiente: Predecir una posible falla de la cadena de aisladores de 500kv por la contaminación con ceniza volcánica.



Introducción



Los aisladores son elementos de un Sistema Eléctrico, que son los encargados de soportar mecánicamente los elementos conductores que se encuentran con voltaje en condiciones normales de servicio



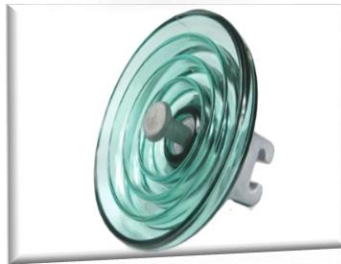
Introducción

Materiales para aislantes

Tipos de aisladores



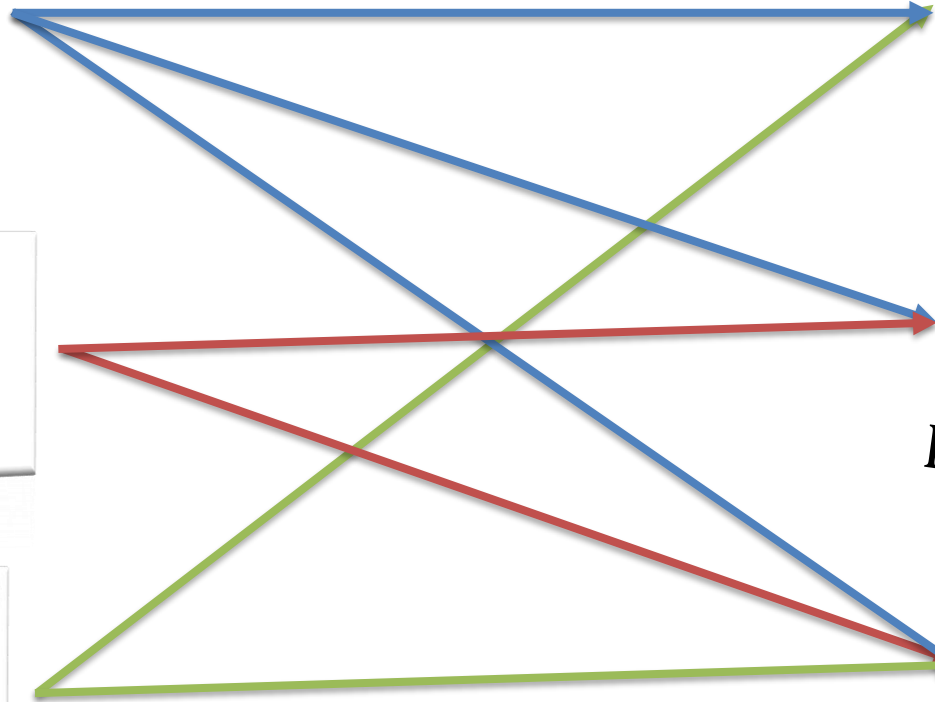
Porcelana



Vidrio



Polímero



Soporte



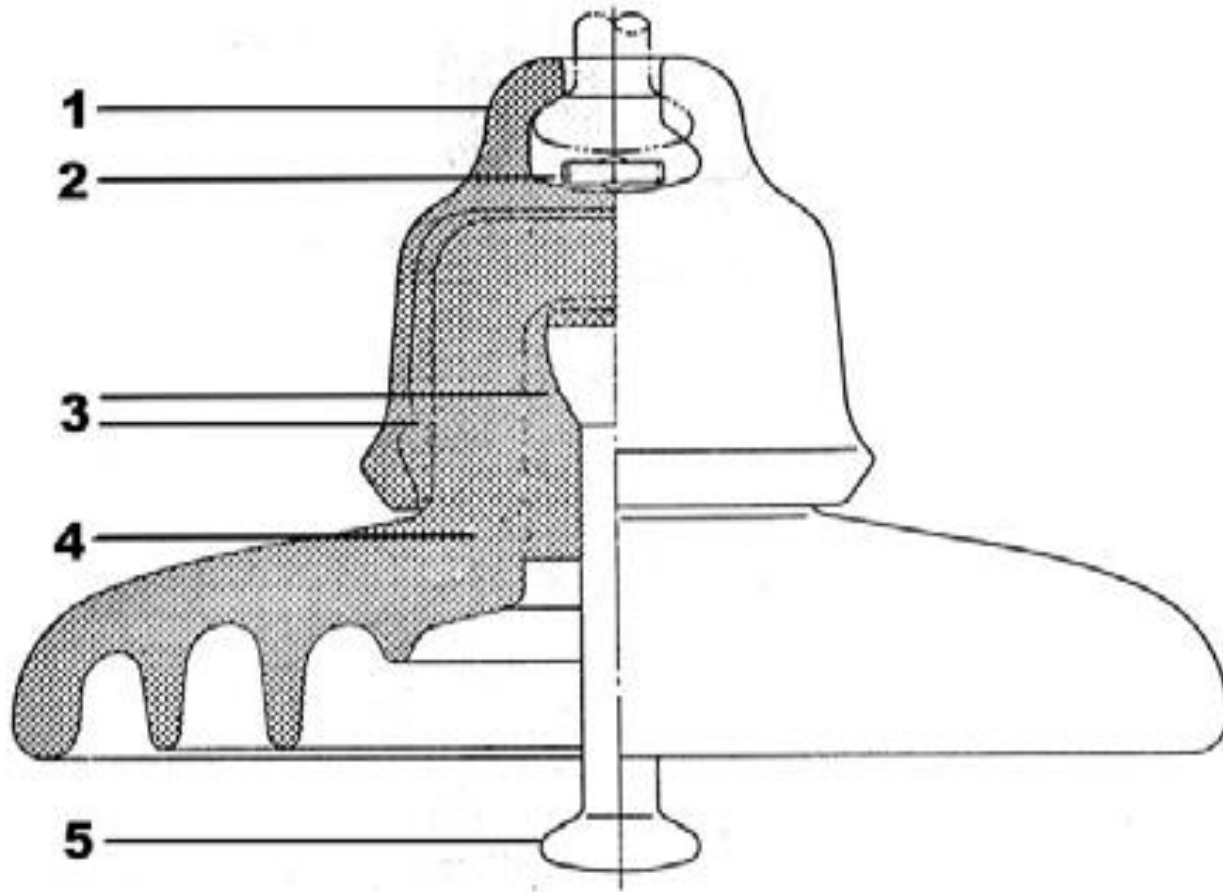
Pin o Espiga



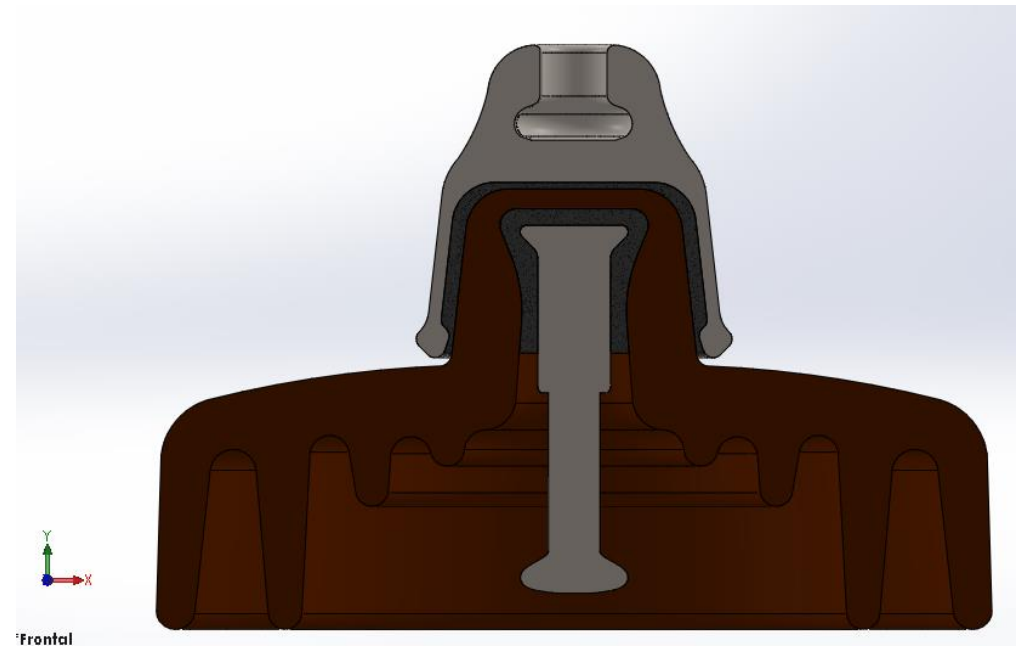
Suspensión



Introducción

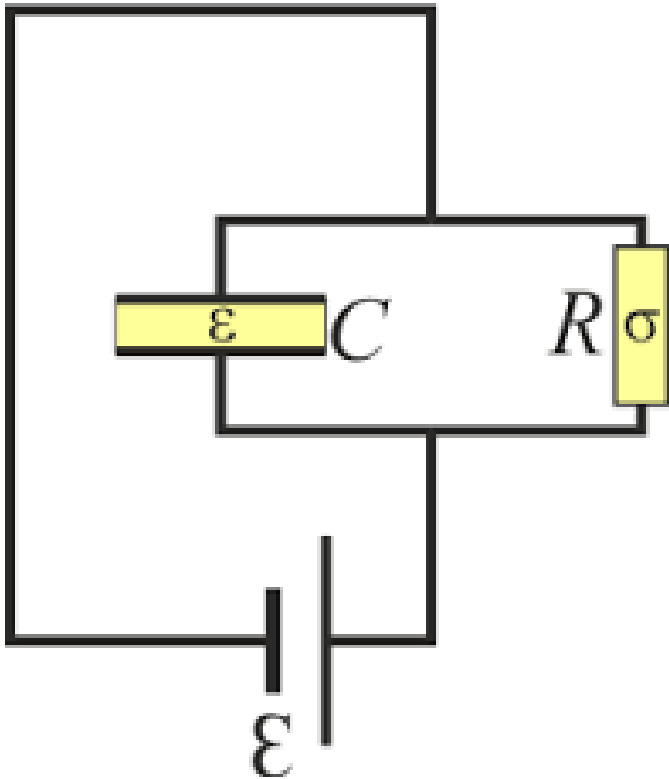


1. Caperuza Metálica.
2. Pasador de Seguridad
3. Comento porttland
4. Material dieléctrico
5. Esparrago de acero inoxidable



Introducción

Perdidas dieléctricas de un aislador



Un dieléctrico es un material mal conductor de electricidad, por lo que se puede utilizar de aislante

Un dieléctrico ideal está libre de pérdidas y esta asociado a un aislador

Un dieléctrico real siempre está asociado con la pérdida.



Introducción

Cálculo de cadena de aisladores

$$Na = V_{ff} * \frac{D_f}{d_f}$$

Número de aisladores

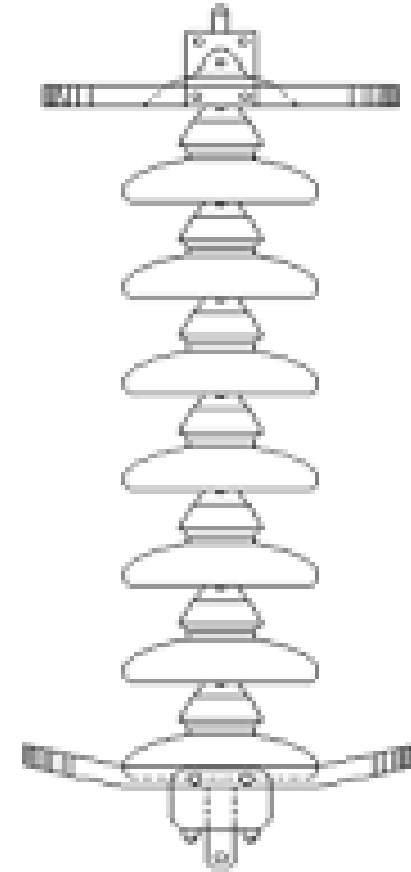
$$D_{fc} = \frac{D_f}{\sqrt{\delta}} \left(\frac{mm}{kV} \right)$$

Distancia de fuga del contaminante

$$\delta = \frac{3.86 + b}{273 + t}$$

Densidad relativa del aire

$$Na = 1.1 * V_{ff} * \frac{D_{fc}}{d_f}$$



Introducción

Contaminación de aisladores con ceniza volcánica

- Contaminación tipo A o tipo capa sólida
- Contaminación tipo B o tipo niebla salina

Contaminación tipo A o tipo capa sólida

Contaminación Activa o Densidad de Depósito de Sal Equivalente (ESDD)

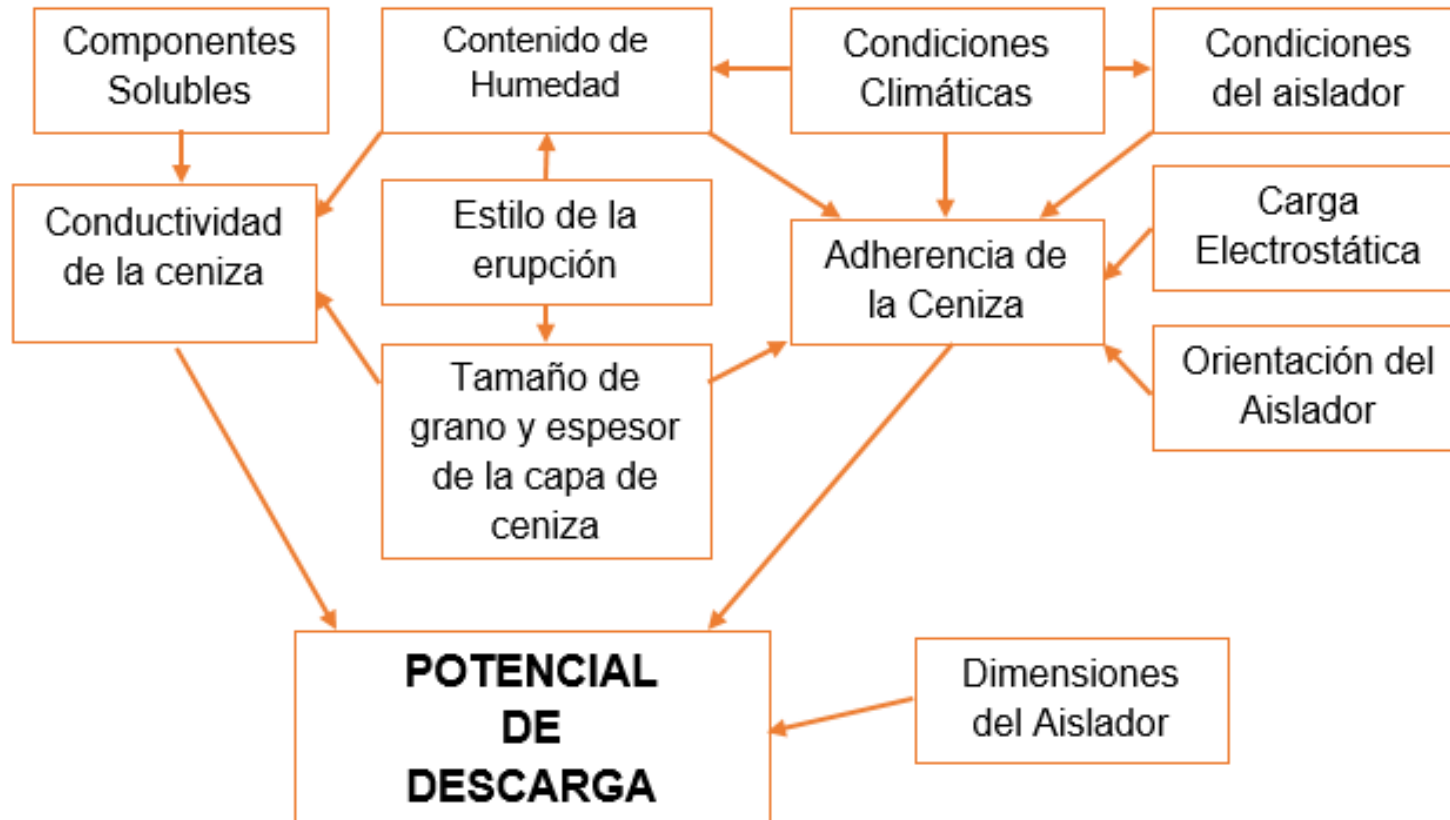
Contaminación Inerte o Densidad de depósito no Soluble (NSDD)

$$ESDD = S_a * \frac{V}{A}$$



Introducción

Impacto de ceniza sobre los aisladores



Introducción

Flashover Voltage

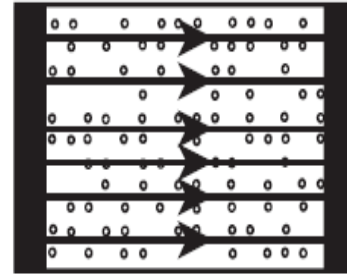


Existen grandes números de parámetros que intervienen en el proceso de contorno de los aisladores contaminados, estos son: la conductividad o resistividad de la capa superficial del contaminante, el contenido de agua y su distribución espacial, la turbulencia del aire, las propiedades de la superficie y estructura química de la capa superficial.

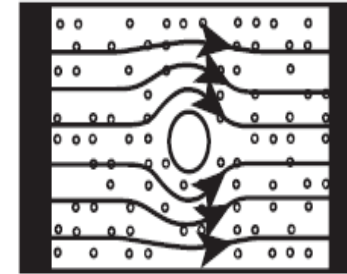


Introducción

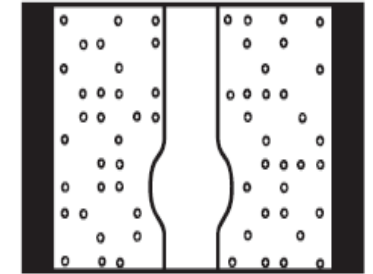
Proceso de formación de un arco en una superficie contaminada de fácil humedecimiento



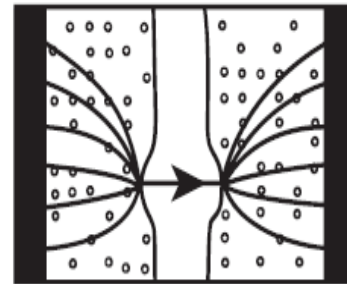
a) flujo uniforme de corriente de fuga en la capa de contaminación húmeda



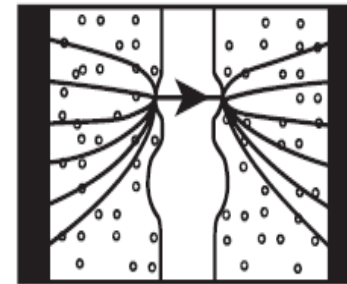
b) calentamiento local de la corriente de fuga forma un punto seco



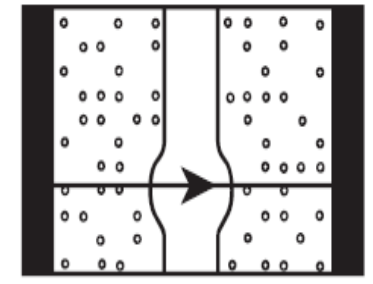
c) las zonas secas crecen y se unen, formando una banda seca, que interrumpe la corriente



d) arco local a través de la banda seca, hace que las regiones de alta densidad de corriente en las raíces del arco



e) La banda seca crece en las raíces del arco hasta que se reducen las rayas eléctricas; el arco migra lateralmente.

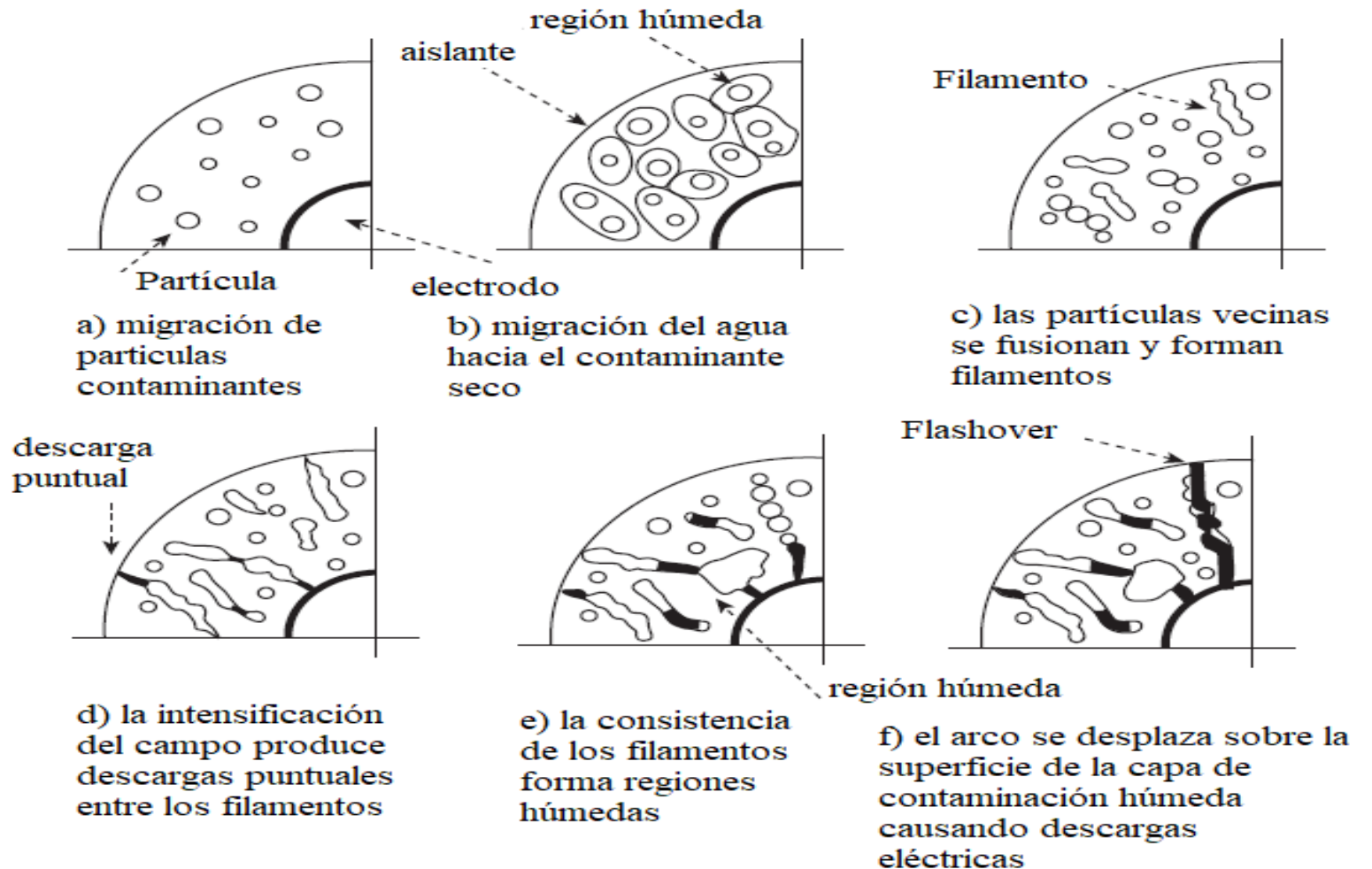


f) el arco crece a lo largo de la superficie húmeda hasta alcanzar una longitud crítica, lo que lleva a que se produzca una descarga eléctrica entre los electrodos



Introducción

Proceso de formación de un arco en una superficie contaminada de difícil humedecimiento



Introducción

Modelado de Flashover

El proceso de ignición de la cadena del aislador se reconoce generalmente como un circuito en serie formado por un arco parcial y una capa de contaminación residual

$$U_m = U_{arc_m} + U_{p_m} = AxI_m^{-n} + r_a(L - x)I_m$$

El criterio de propagación del arco

$$E_p > E_{arc}$$

$$E_p = \frac{U_{p_m}}{L - x} = \frac{r_a(L - x)I_m}{L - x} = r_a I_m$$

$$E_{arc} = \frac{U_{arc_m}}{x} = \frac{AxI_m^{-n}}{x} = AI_m^{-n}$$

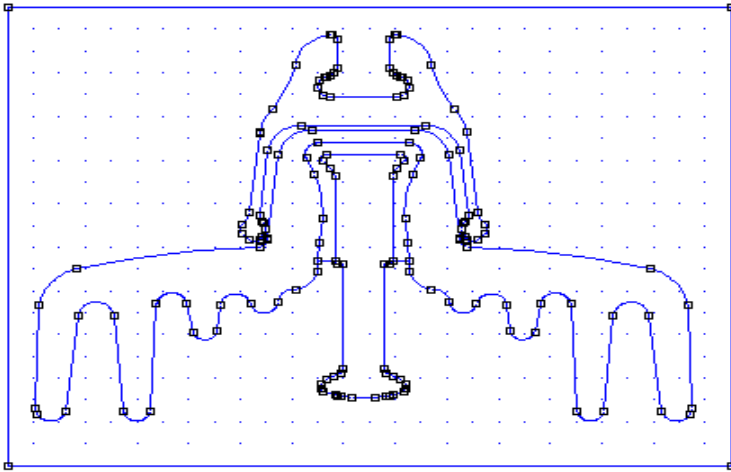


Introducción

Etapas de solución de un problema de FEM

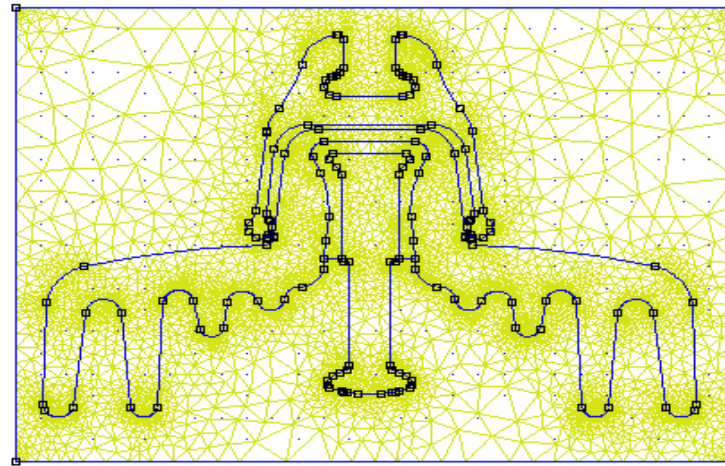
Pre-Procesamiento

- Definir el dominio geométrico del problema.
- Definir las propiedades geométricas de los elementos
- Definir las restricciones físicas



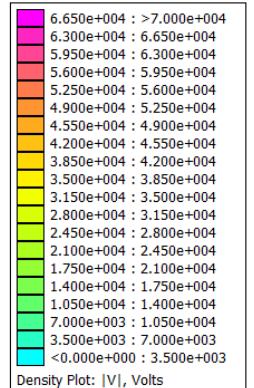
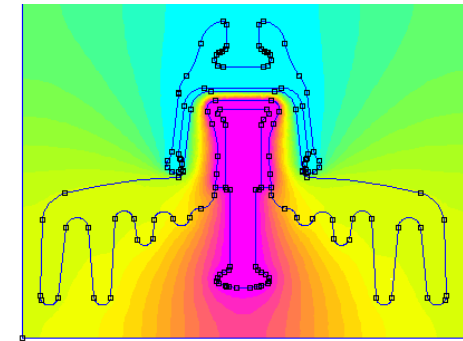
Procesamiento o Solución

- Ensambla las ecuaciones algebraicas gobernantes en forma matricial



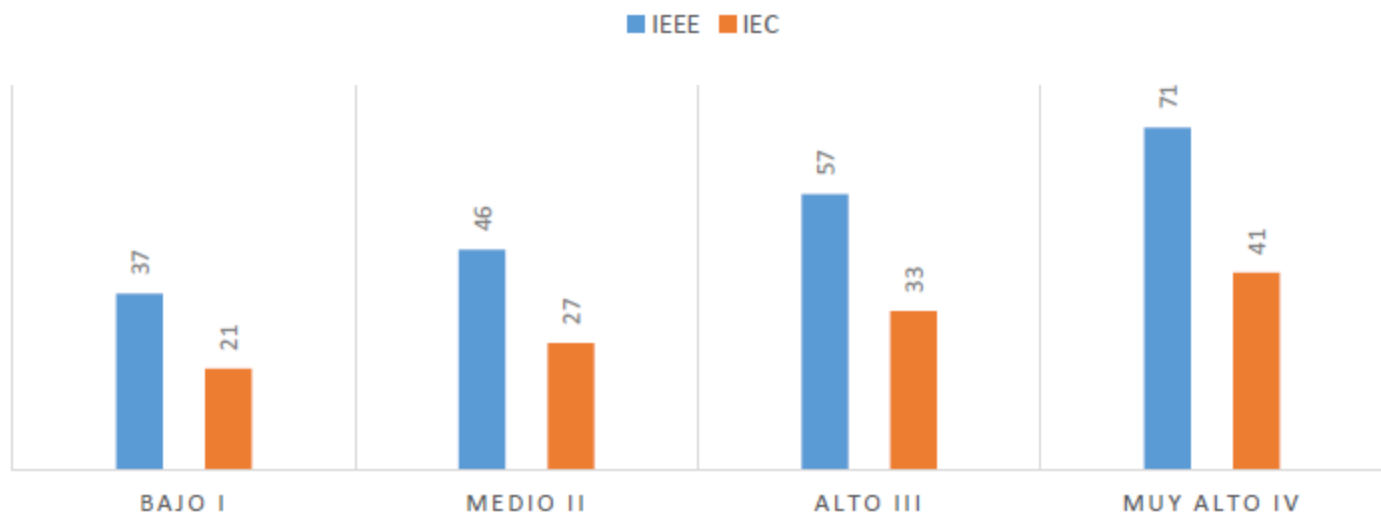
Post-Procesado

- Producir esquemas dinámicos de la respuesta del modelo.
- Producir graficas de color codificado para el campo de voltaje



Pre-análisis

NÚMERO DE AISLADORES EN FUNCIÓN DEL NIVEL DE CONTAMINACIÓN SEGÚN LAS NORMAS IEC Y IEEE

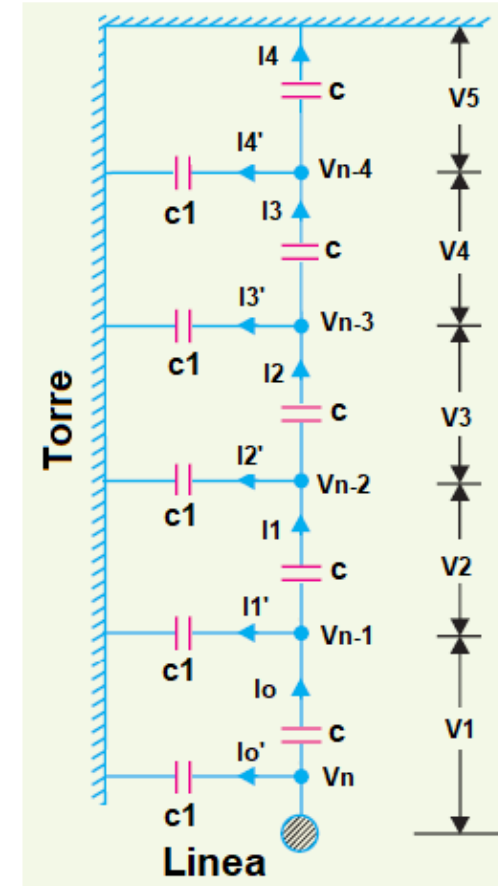
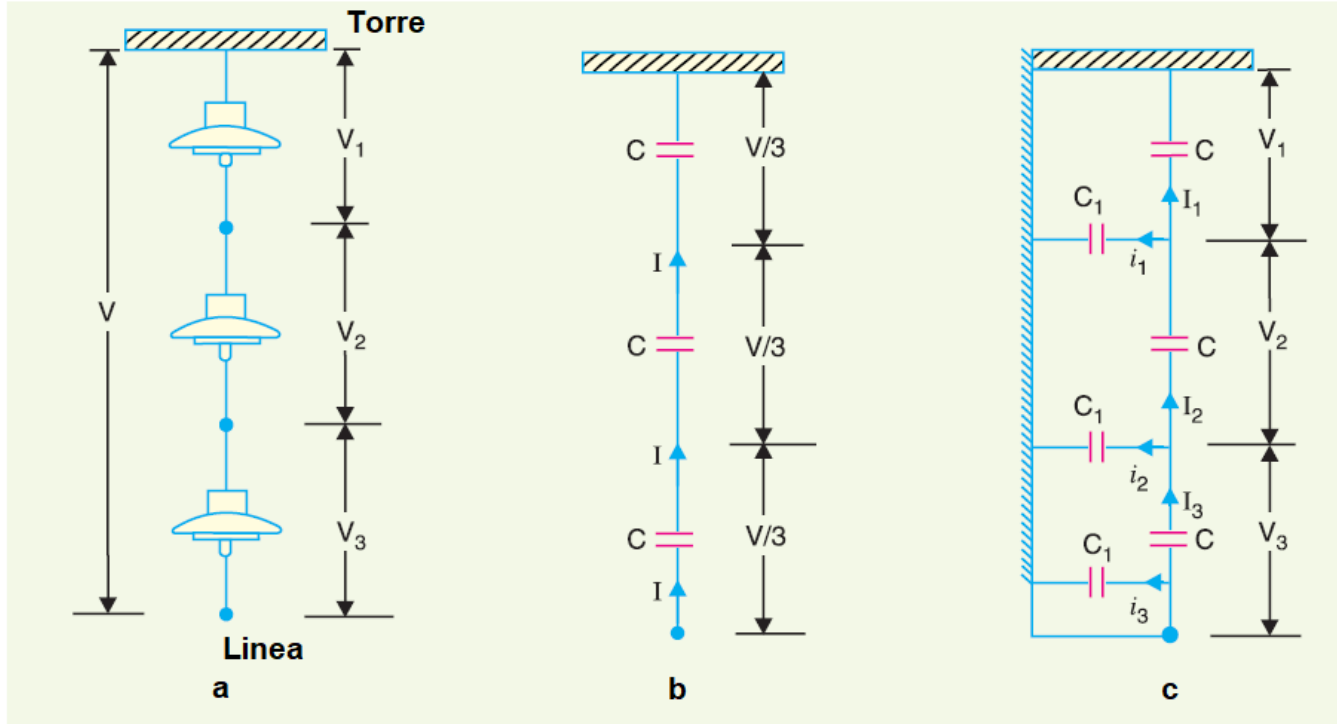


Grado de Contaminación	Tipo de Ambiente	Mínima distancia de fuga (mm/kV) IEC	Mínima distancia de fuga (mm/kV) IEEE
I Bajo	<ul style="list-style-type: none"> Áreas sin industria y con baja densidad de viviendas equipadas con Plantas de calefacción. Áreas con baja densidad de industria o casas, pero sujetas a frecuentes vientos o lluvias. Áreas agrícolas Áreas montañosas Todas estas zonas están situadas a una distancia mínima de 10 a 20 Km del mar y no estarán expuestas a vientos directamente desde el mar 	27.7	16
II Medio	<ul style="list-style-type: none"> Áreas con industria que no producen humo particularmente contaminante y/o densidad media de vientos equipados con plantas de calefacción. Áreas con alta densidad de viviendas y/o industrias, pero sujetas a vientos frecuentes y/o lluvias. Áreas expuestas al viento desde el mar pero no demasiado cerca de las costas (al menos varios Km de distancia). 	34.6	20
III Alto	<ul style="list-style-type: none"> Áreas con alta densidad de industrias y suburbios de grandes ciudades con alta densidad de plantas de calefacción que producen contaminación. Áreas cercanas al mar o en cualquier casa expuesta a vientos del mar 	43.3	25
IV Muy Alto	<ul style="list-style-type: none"> Áreas generalmente de extensión moderada, sometidas a polvos conductores y al humo industrial que produce depósitos conductores particularmente gruesas. Áreas generalmente de extensión moderada, muy cerca de la costa y expuestas al mar o a vientos muy contaminantes del mar. Las zonas desérticas, caracterizadas por la ausencia de lluvias durante largos periodos, vientos que llevan arena de sal, y se someten a condensación regular. 	53.7	31



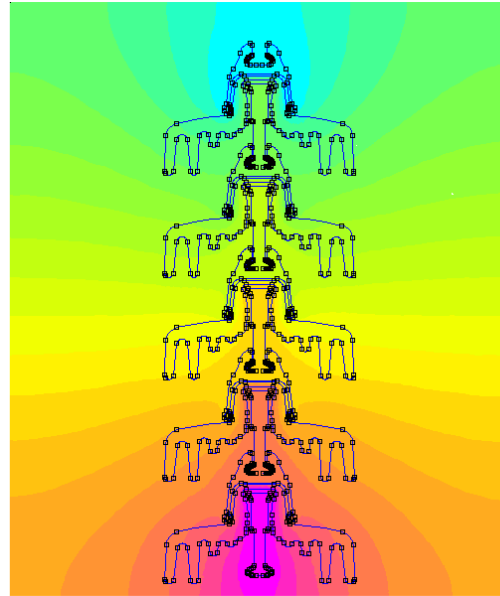
Pre-análisis

Distribución de Voltaje en la Cadena de Aisladores

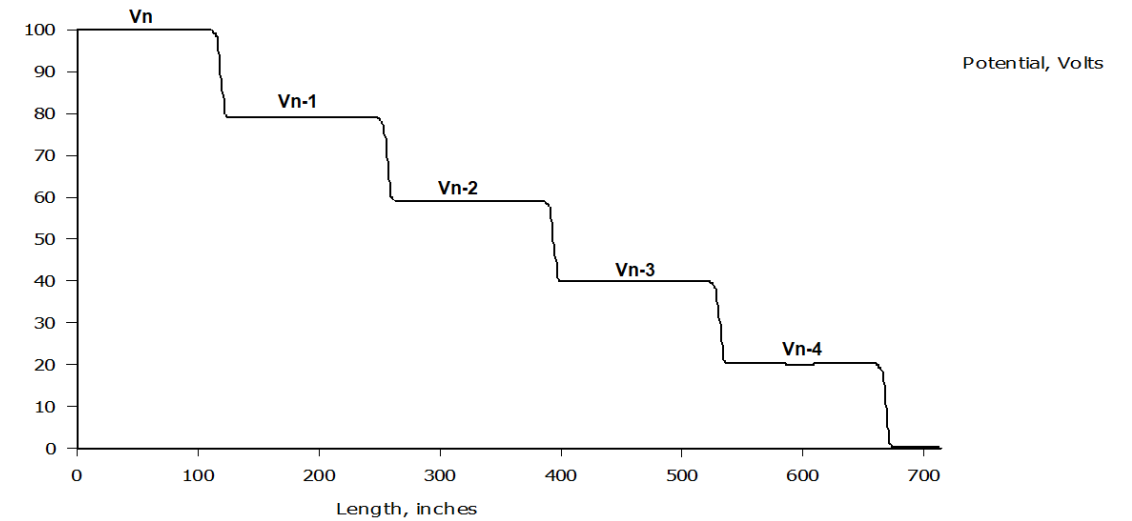
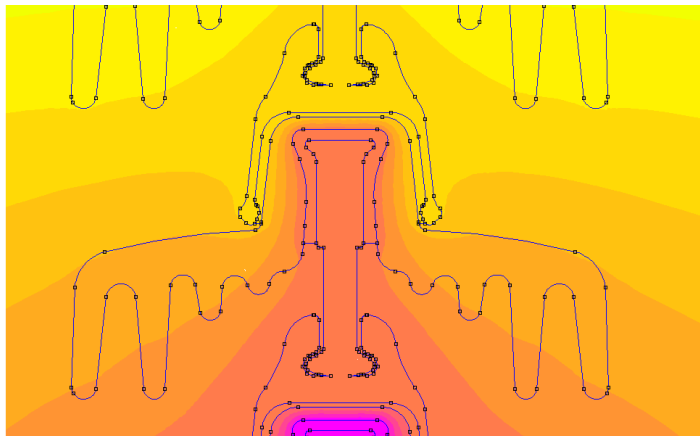


Pre-análisis

Análisis Computacional



Sin herraje de equilibrio de voltaje

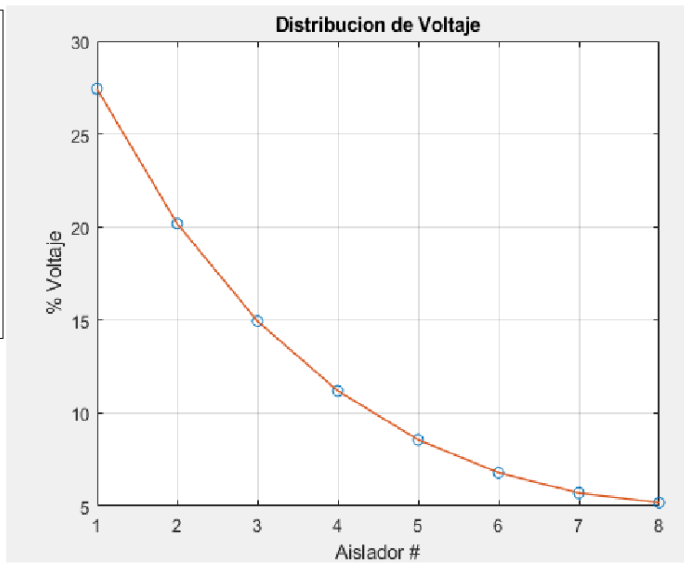
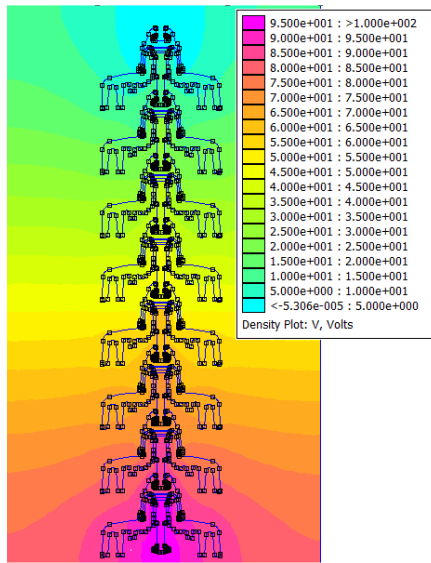
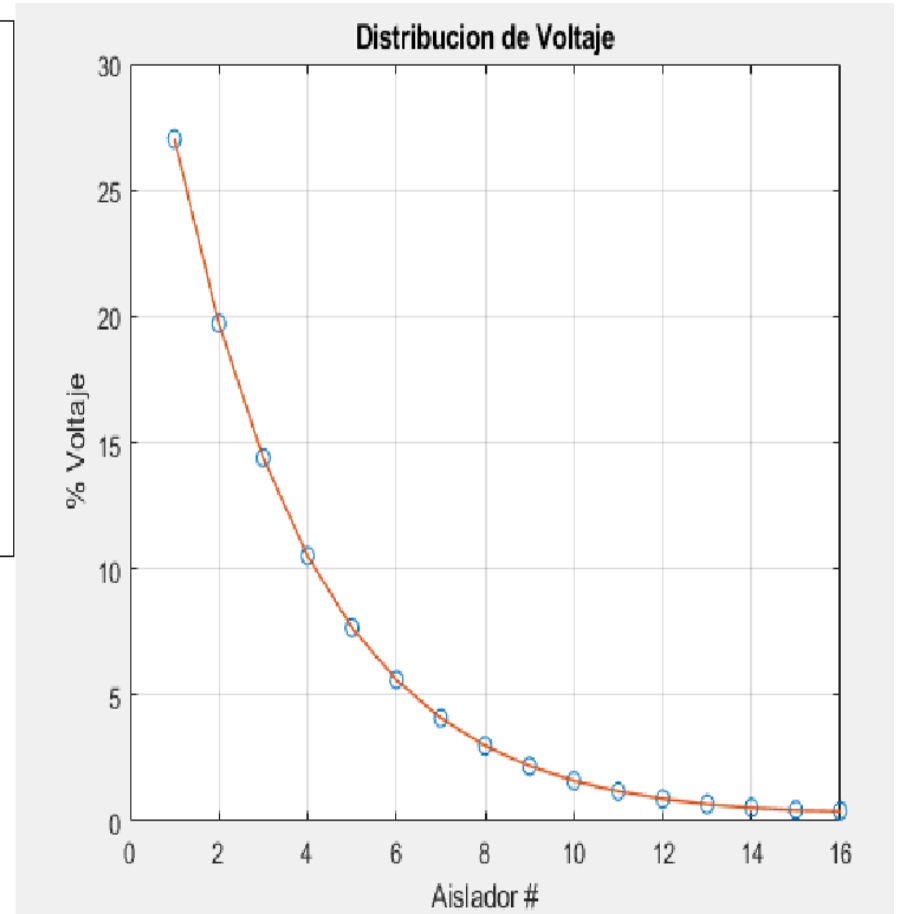
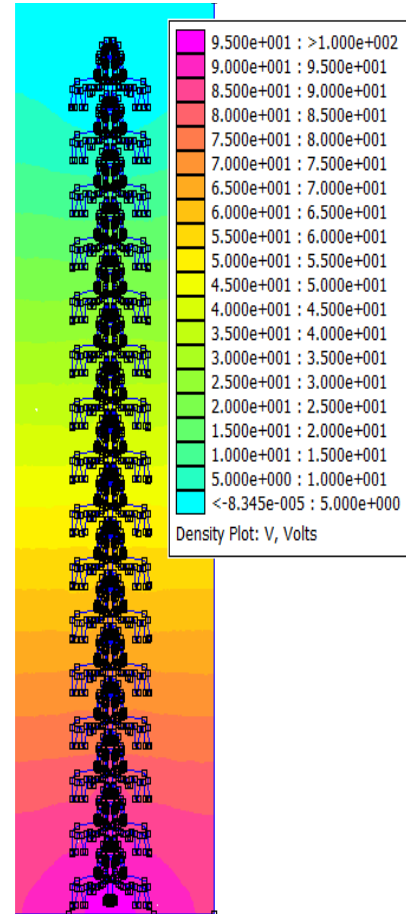
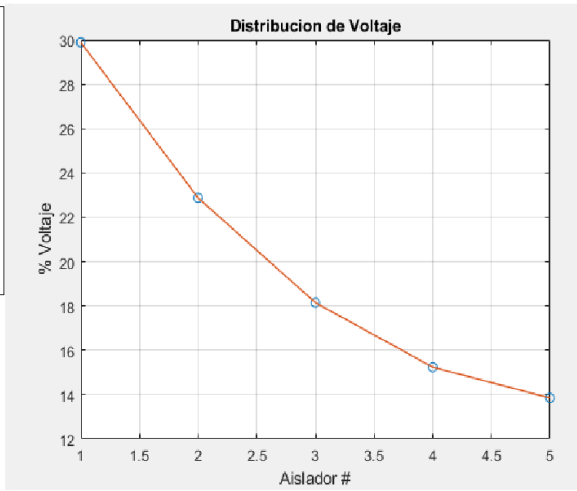
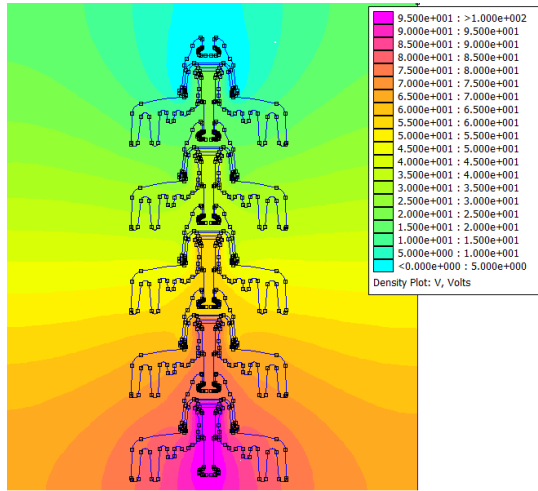


5 aisladores 5 aisladores Sin título

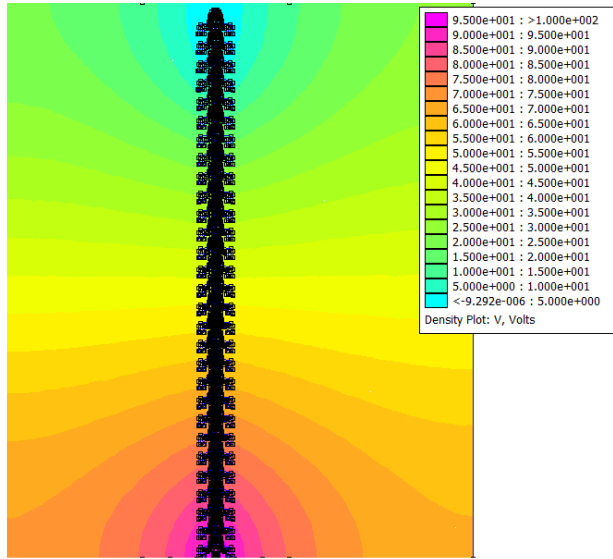


ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

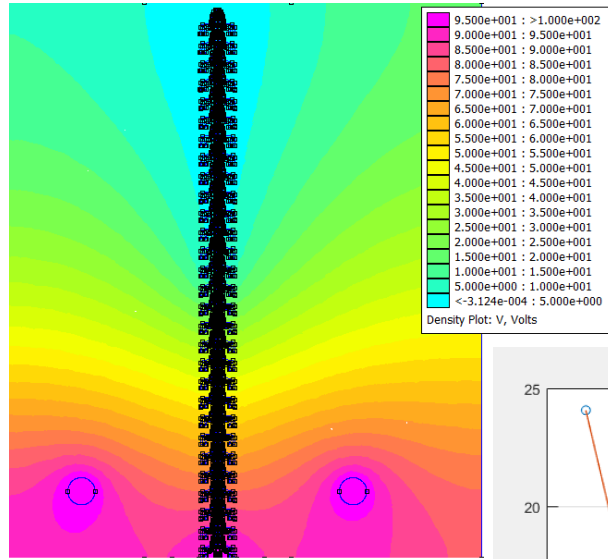
Pre-análisis



Pre-análisis

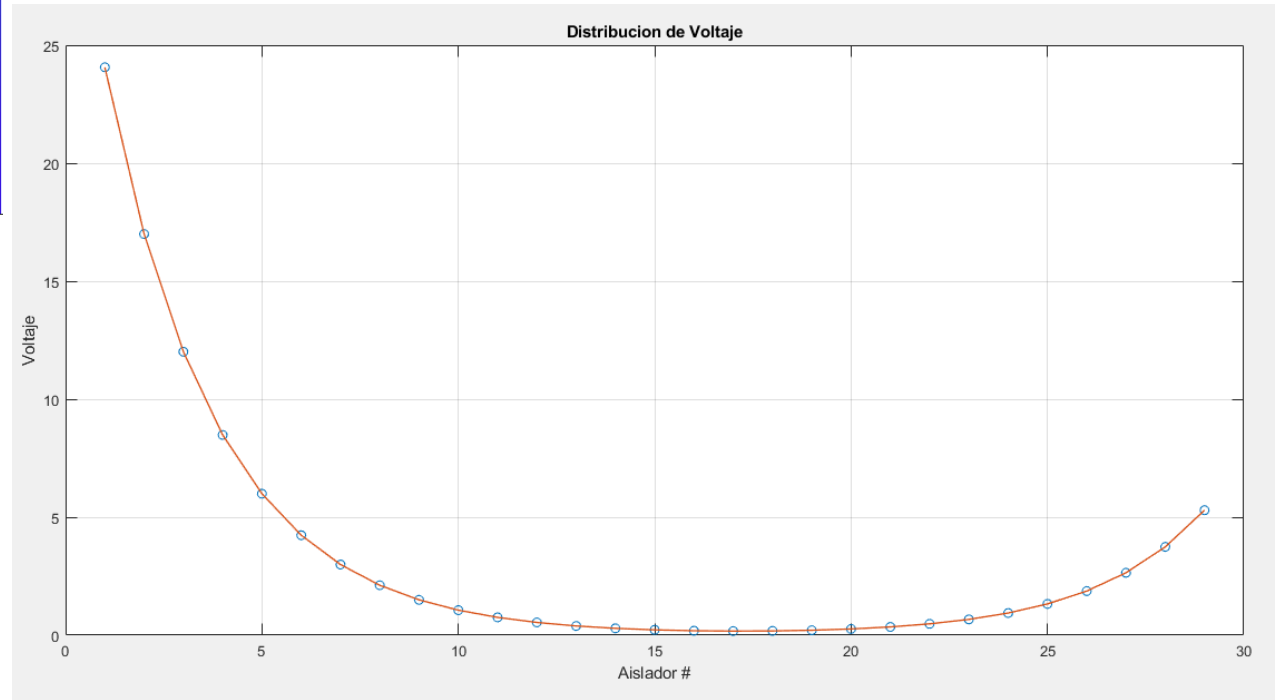
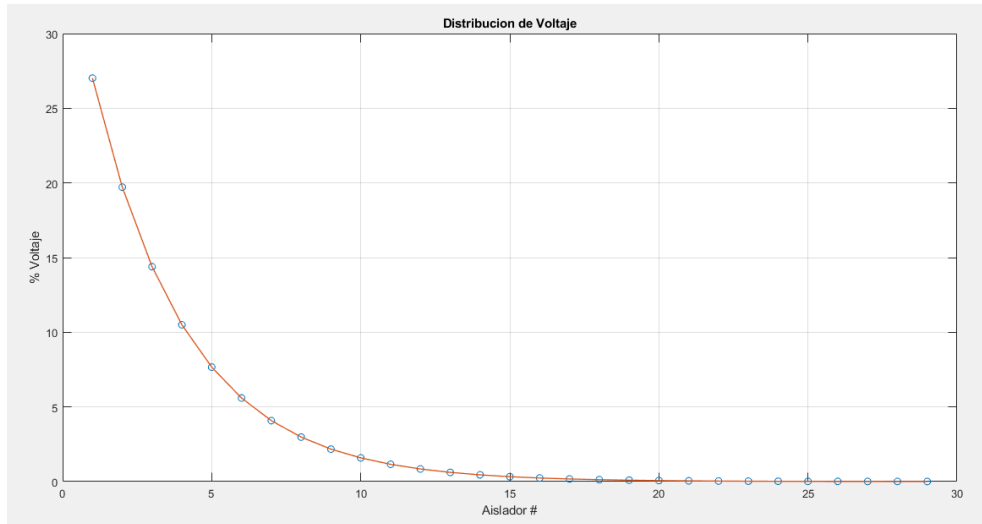


a)



b)

Con herraje de equilibrio de voltaje



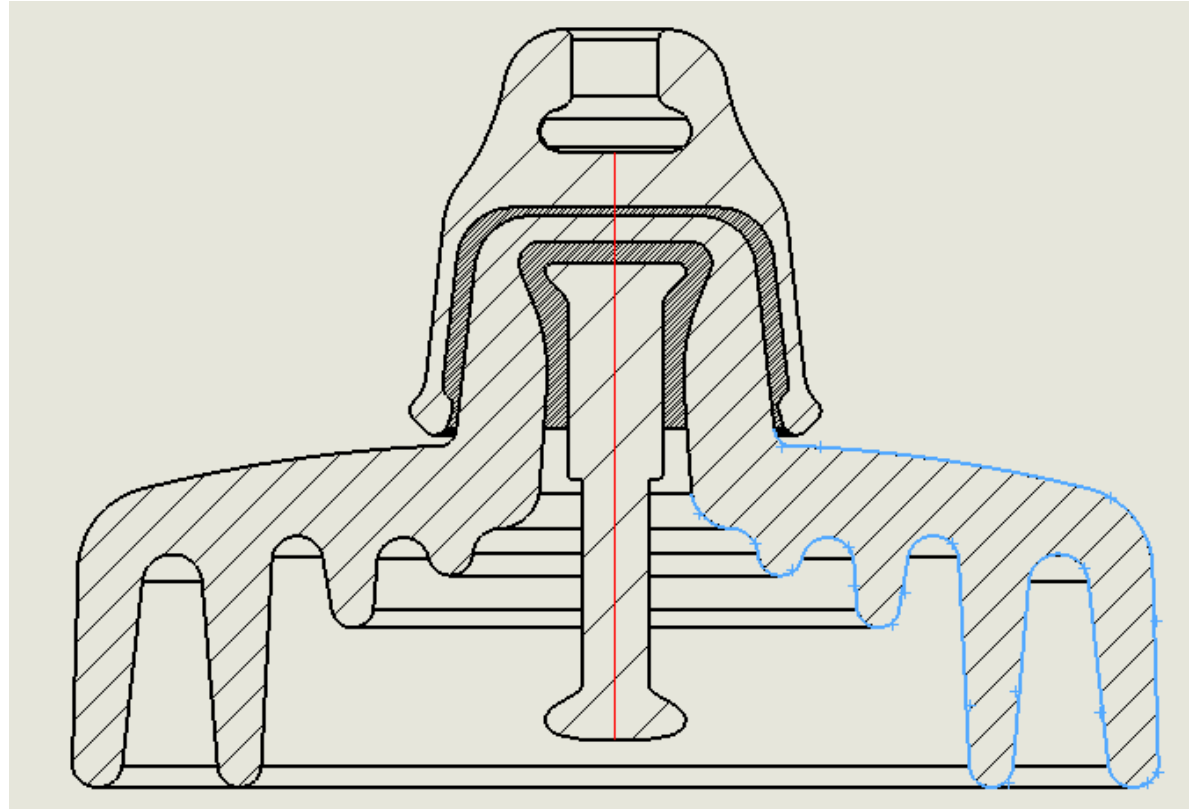
Pre-análisis

Análisis aislador ANSI tipo B C29.2-52-3 FOG

Diámetro eficaz y promedio teórico

$$d_{eff} = \frac{L}{\pi * f}$$

$$f = \int_0^L \frac{dl}{\pi dl} = \frac{L}{\pi D_{eff}}$$



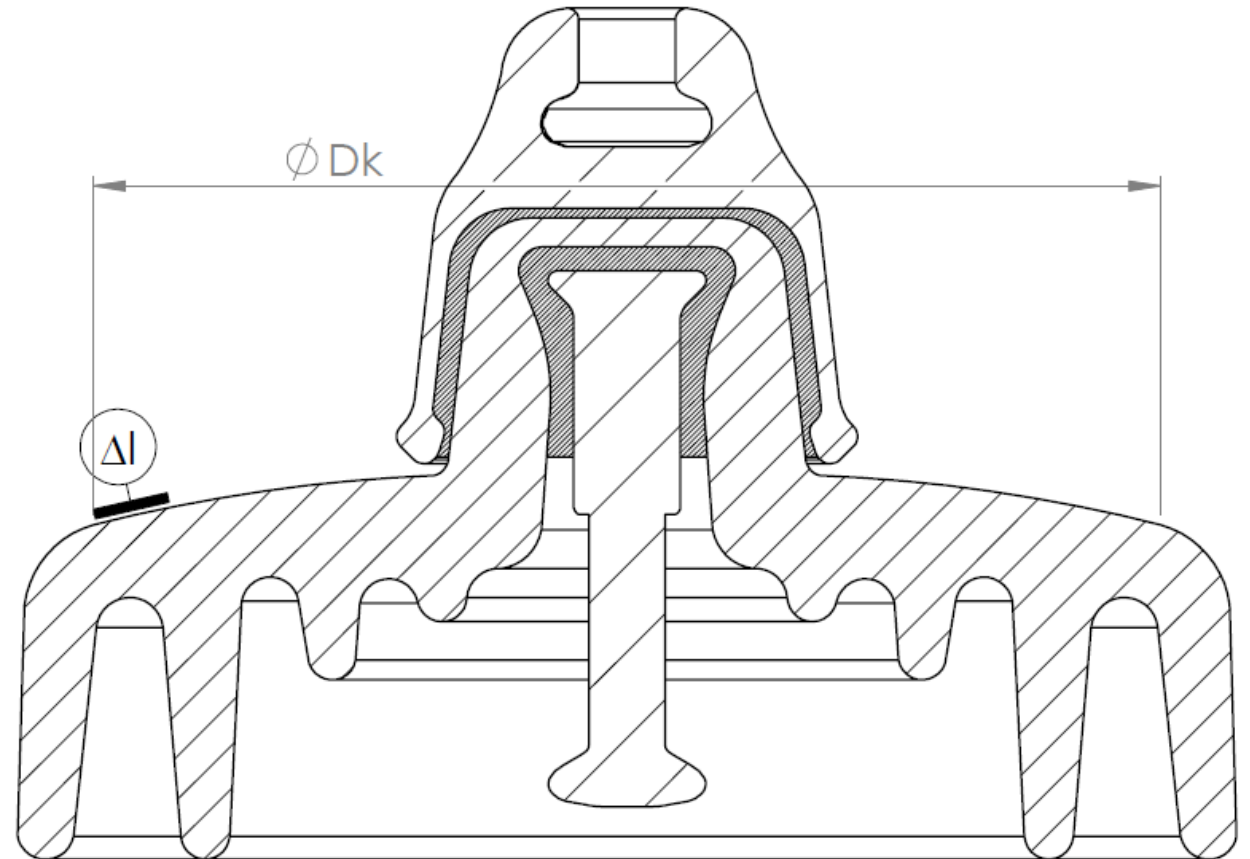
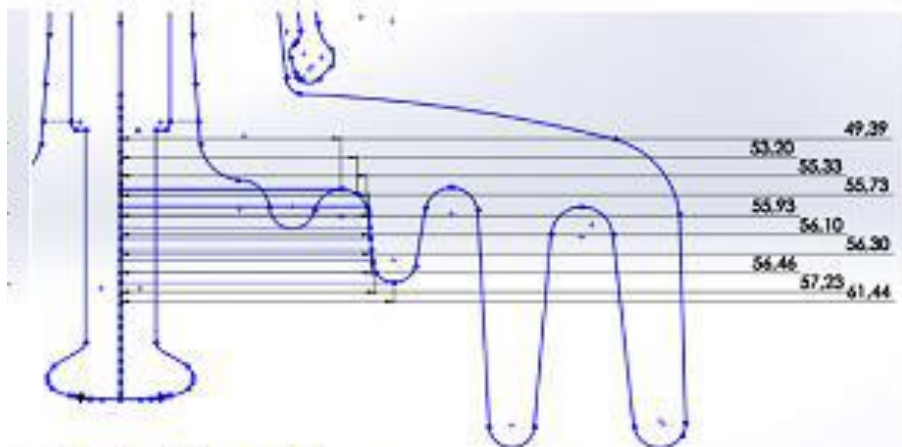
Pre-análisis

Análisis aislador ANSI tipo B C29.2-52-3 FOG

Diámetro eficaz y promedio
práctico experimental

$$D'_{pr} = \frac{D_1 + D_2 + \dots + D_n}{n} = \frac{\sum_{k=1}^{k=n} D_k}{n}$$

$$\frac{1}{D_{eff}} = \frac{1}{n} \left(\frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2} + \dots + \frac{1}{D_n} \right)$$



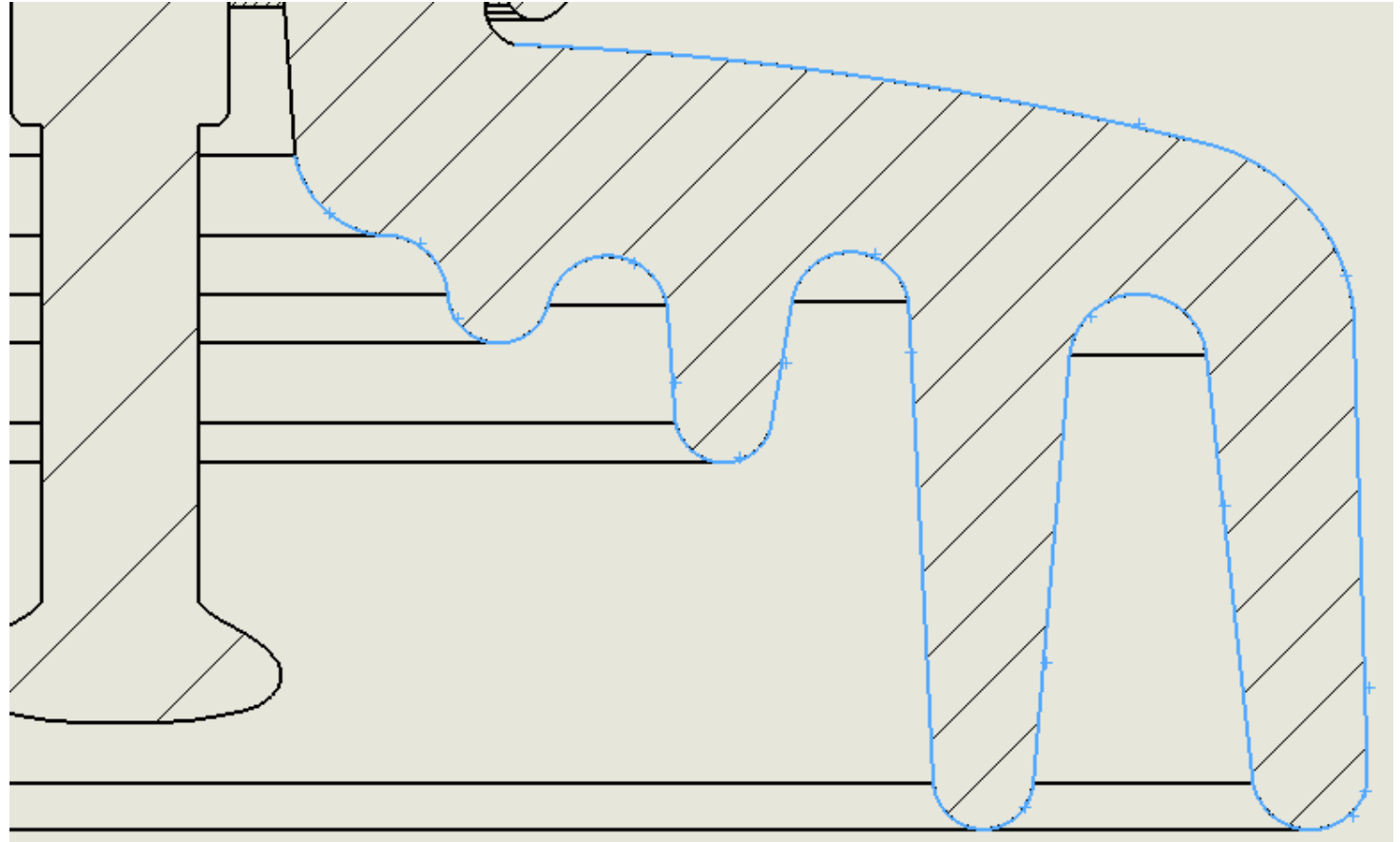
Pre-análisis

Área superficial del aislador

$$A = \int_0^L \pi D(l) dl = \int_0^L \frac{\pi D(l)}{L} L dl$$

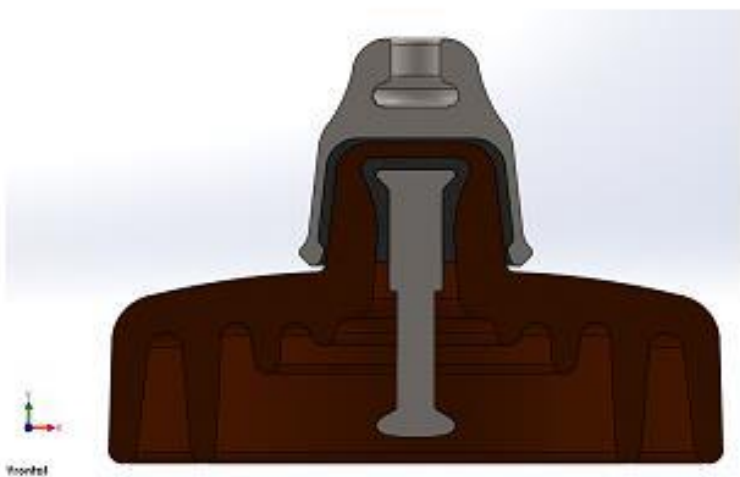
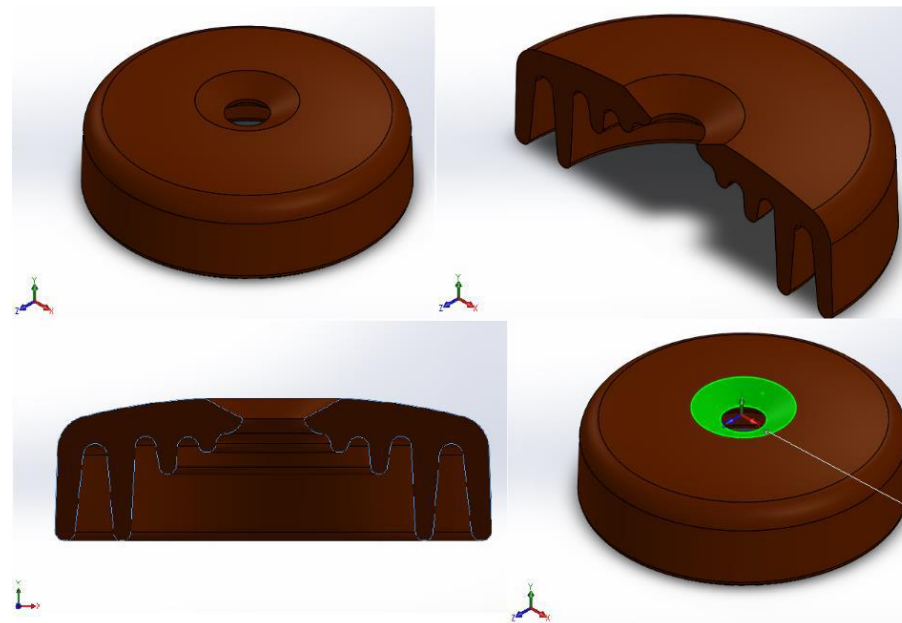
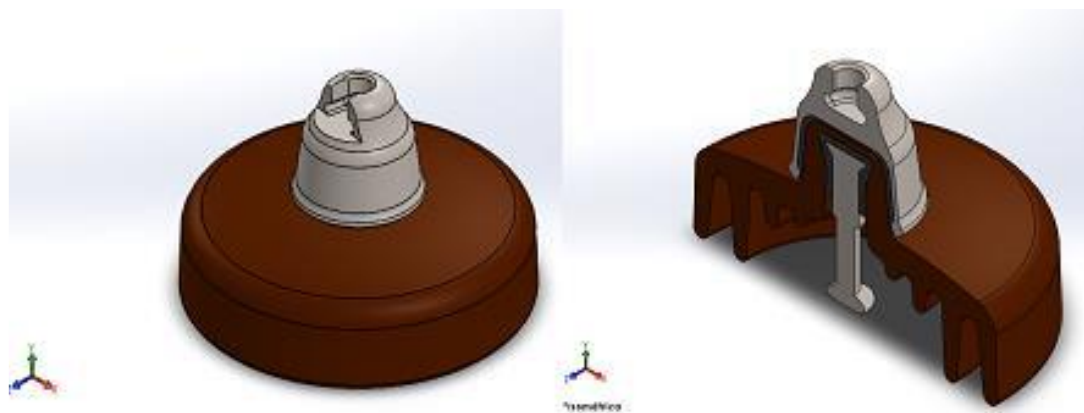
$$D_{Pr} = \int_0^L \frac{D(l)}{L} dl$$

$$A = \pi L D_{Pr}$$



Pre-análisis

Área superficial del aislador



$$\%error = \frac{|matemático - computacional|}{computacional} * 100$$

$$\%error = \frac{|241058,7805 \text{ mm}^2 - 241568.34\text{mm}^2|}{241568.34\text{mm}^2} * 100 = 0.21\%$$



Pre-análisis

Análisis de la Ceniza depositada en el aislador

Análisis del Depósito de Sal Equivalente ESDD sobre el aislador

Escenario	Contam. Superior	Contam. Inferior	Volumen agua destilada V (cm3)	Area de contaminación A (cm2)	Factor b	Temperatura de la solución θ (°C)	Conductividad de la Solución $\sigma\theta$ (S/m)	Conductividad a 20 °C σ_{20} (S/m)	Salinidad S_a (kg/m3)	ESDD (mg/cm2)	Wf (g)	Wi (g)	NSDD (mg/cm2)
1	1mm	-	500	436.5	0.0232	19.00	0.0123	0.0126	0.0665	0.0762	69.56	18.55	116.86
2	3mm	-	500	436.5	0.0232	19.00	0.0367	0.0376	0.2044	0.2341	135	18.55	266.78
3	6mm	-	500	436.5	0.0232	19.00	0.0736	0.0753	0.4184	0.4793	228.63	18.55	481.28
4	1mm	-	500	436.5	0.0232	19.00	0.0125	0.0127	0.0671	0.0769	49.32	15.14	78.30
	-	1mm	500	1043	0.0232	19.00	0.0274	0.0280	0.1511	0.0724	39.4	15.14	23.26
5	3mm	-	500	436.5	0.0232	19.00	0.0304	0.0311	0.1683	0.1928	97.66	15.14	189.05
	-	1mm	500	1043	0.0232	19.00	0.0313	0.0320	0.1735	0.0832	48.72	15.14	32.20
6	6mm	-	500	436.5	0.0232	19.00	0.0761	0.0779	0.4332	0.4962	186.34	15.14	392.21
	-	1mm	500	1043	0.0232	19.00	0.0385	0.0394	0.2147	0.1029	49	15.14	32.46

$$ESDD = S_a * \frac{V}{A}$$

$$S_a = (5,7 \sigma_{20})^{1.03}$$

$$\sigma_{20} = \frac{1.03 \sqrt{\frac{ESDD * A}{V}}}{5.7}$$

$$\sigma_{20s} = 0.0533 \text{ S/m}$$

$$\sigma_{20i} = 0.0565 \text{ S/m}$$



Pre-análisis

Análisis de la resistencia de contaminación por ceniza volcánica en el aislador

$$R = \rho_s \int_0^L \frac{dL}{\pi d(L)}$$

$$d_{eff} = \frac{L}{\int_0^L \frac{dL}{\pi d(L)}}$$

$$R = \frac{\rho_s L}{\pi D_{eff}}$$

Contaminación n (mm)	Resistencia de Contaminación Superior (Ω)	Resistencia de Contaminación Superior (Ω)	Contaminación n (mm)	Resistencia de Contaminación Superior (Ω)	Resistencia de Contaminación Superior (Ω)
1	6206,12382	10946,96275	11	564,1930745	995,1784322
2	3103,06191	5473,481377	12	517,176985	912,2468961
3	2068,70794	3648,987585	13	477,39414	842,074058
4	1551,530955	2736,740688	14	443,2945586	810,925911
5	1241,224764	2189,392551	15	413,741588	729,7975169
6	1034,35397	1824,493792	16	387,8827387	684,1851721
7	886,5891171	1563,851822	17	365,0661071	643,9389855
8	775,7654775	1368,370344	18	344,7846567	608,1645974
9	689,5693133	1216,329195	19	326,6380958	576,1559344
10	620,612382	1094,696275	20	310,306191	547,3481377

$$R = \frac{\rho_s * 430mm}{\pi * 144.1mm} \quad \text{ó} \quad \frac{\rho * 430mm}{\pi * h * 144.1mm} \approx \frac{\rho_{sp} * 150mm}{\pi * h_{sp} * 144.1mm} + \frac{\rho_{if} * 280mm}{\pi * h_{if} * 144.1mm}$$



Análisis

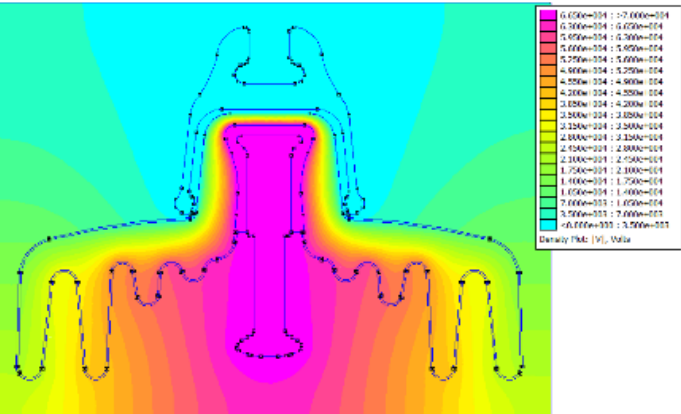
CASOS	CONTAMINACIÓN h (mm)	CASOS	CONTAMINACIÓN h (mm)
1	SUPERIOR 0	8	SUPERIOR 4
	INFERIOR 0		INFERIOR 3
2	SUPERIOR 1	9	SUPERIOR 4
	INFERIOR 0		INFERIOR 4
3	SUPERIOR 1	10	SUPERIOR 5
	INFERIOR 1		INFERIOR 4
4	SUPERIOR 2	11	SUPERIOR 5
	INFERIOR 1		INFERIOR 5
5	SUPERIOR 2	12	SUPERIOR 6
	INFERIOR 2		INFERIOR 5
6	SUPERIOR 3	13	SUPERIOR 6
	INFERIOR 2		INFERIOR 6
7	SUPERIOR 3		
	INFERIOR 3		

MATERIAL	PERMEABILIDAD	CONDUCTIVIDAD (S/m)
AIRE	1	$1.00 \cdot 10^{-14}$
CONTAMINACIÓN AMBIENTAL (HÚMEDO)	10	$1.50 \cdot 10^{-4}$
CONTAMINACIÓN AMBIENTAL (LLUVIOSO)	50	$5 \cdot 10^{-4}$
CEMENTO (UNIONES)	15	$5.30 \cdot 10^{-3}$
ACERO (CAPERUZA, PIN)	1000000	598000000
PORCELANA (AISLANTE)	6	$1.00 \cdot 10^{-8}$
CONTAMINACIÓN (SUPERIOR)	80	0.0533
CONTAMINACIÓN (INFERIOR)	80	0.0565

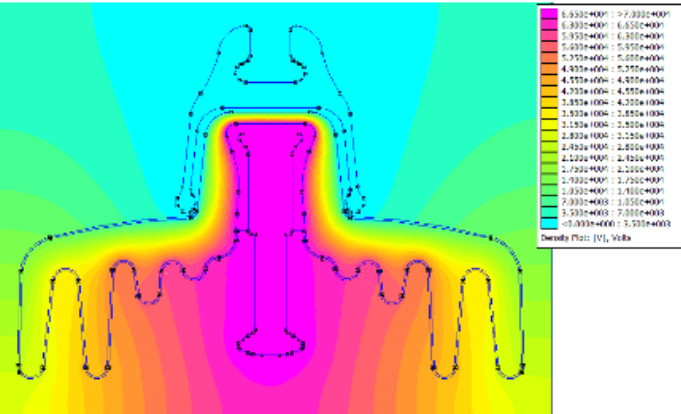


Análisis

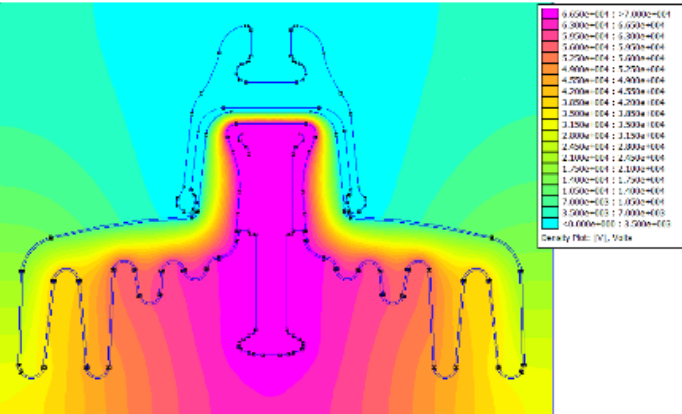
Influencia de la contaminación ambiental en la corriente de fuga



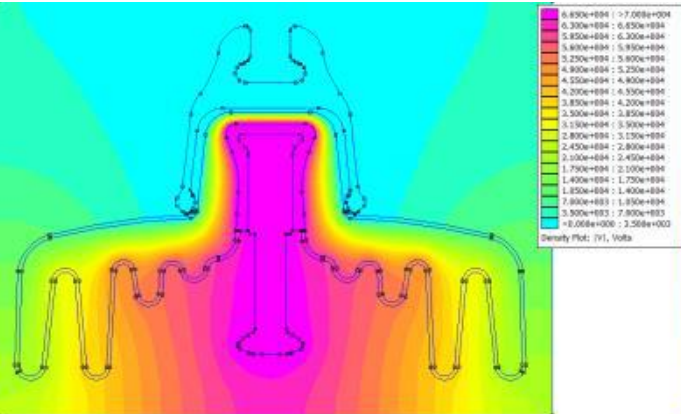
a)



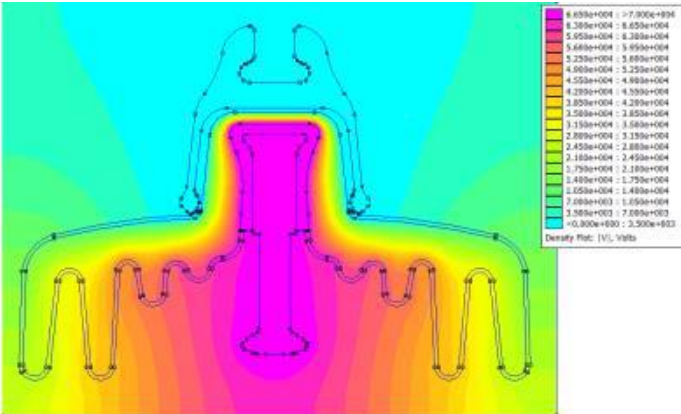
b)



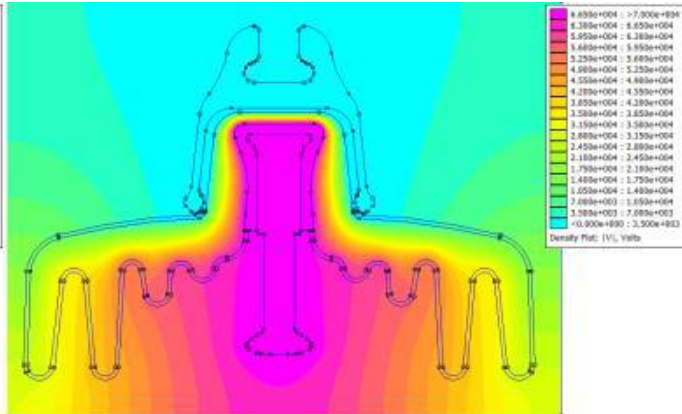
c)



a)



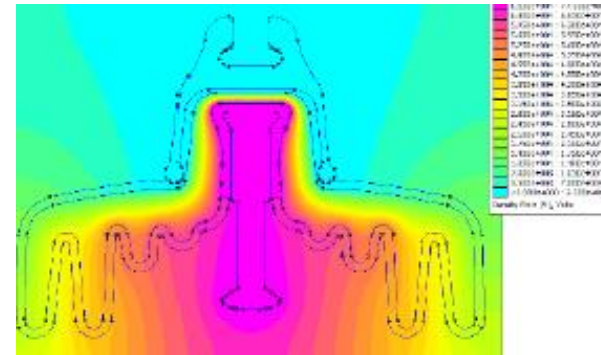
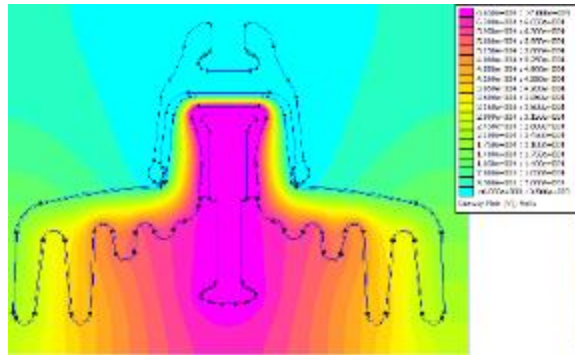
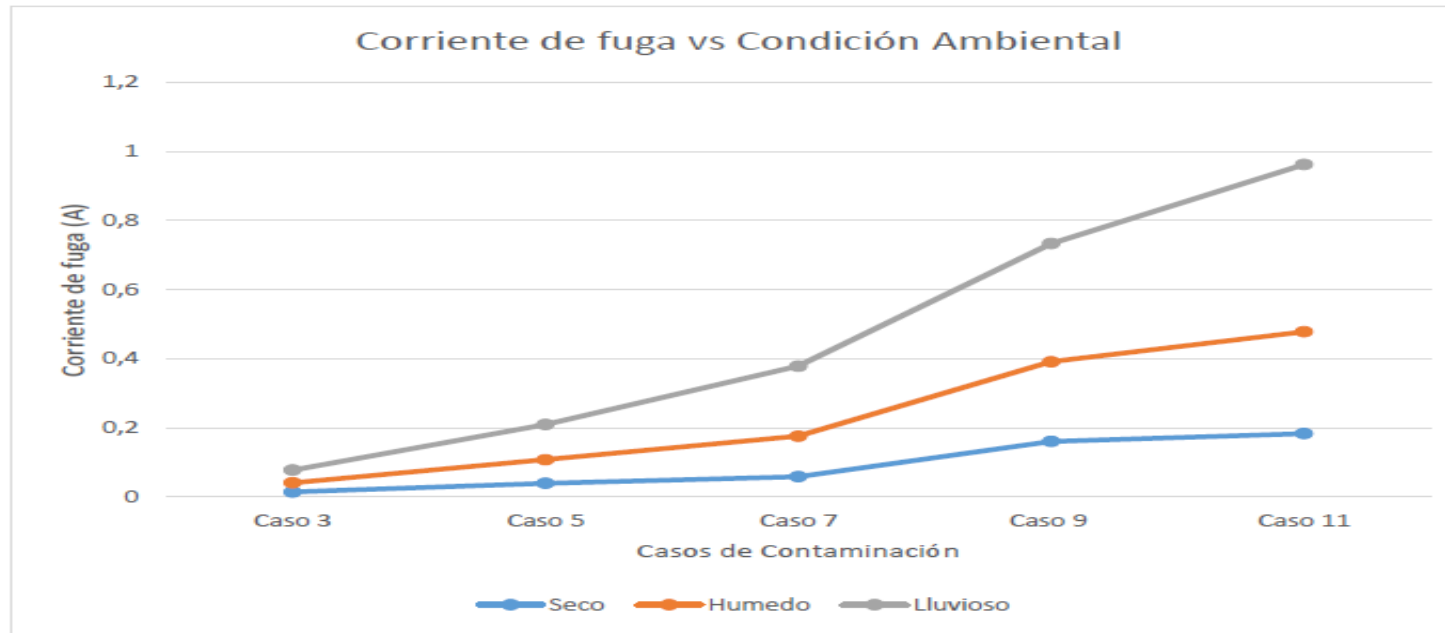
b)



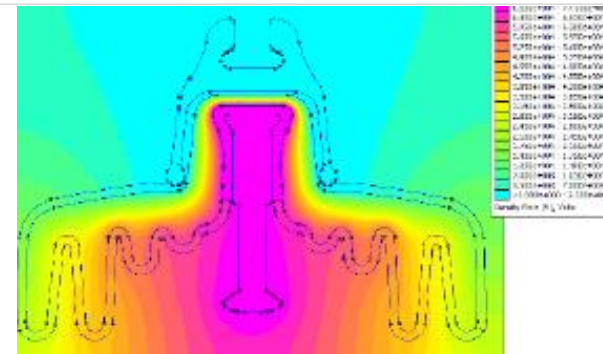
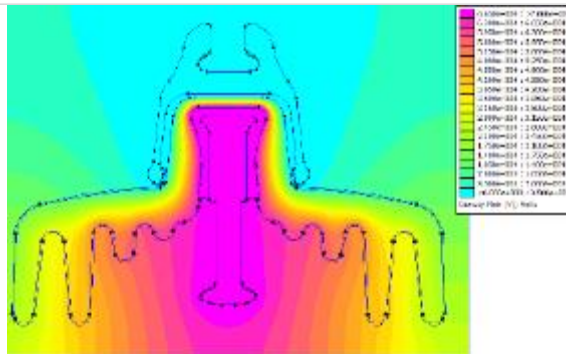
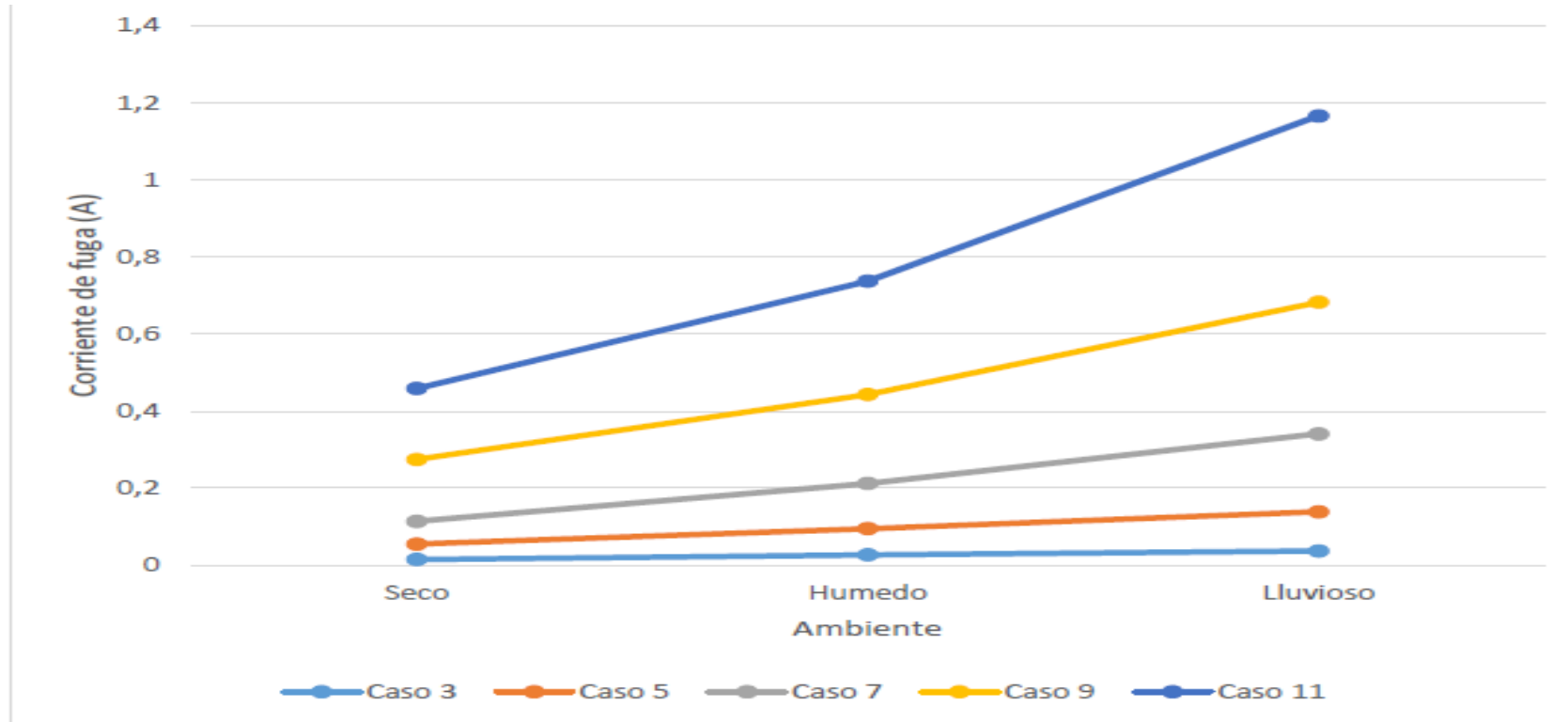
c)



Análisis

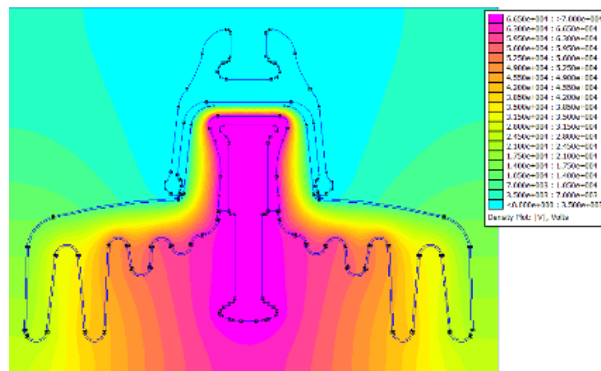
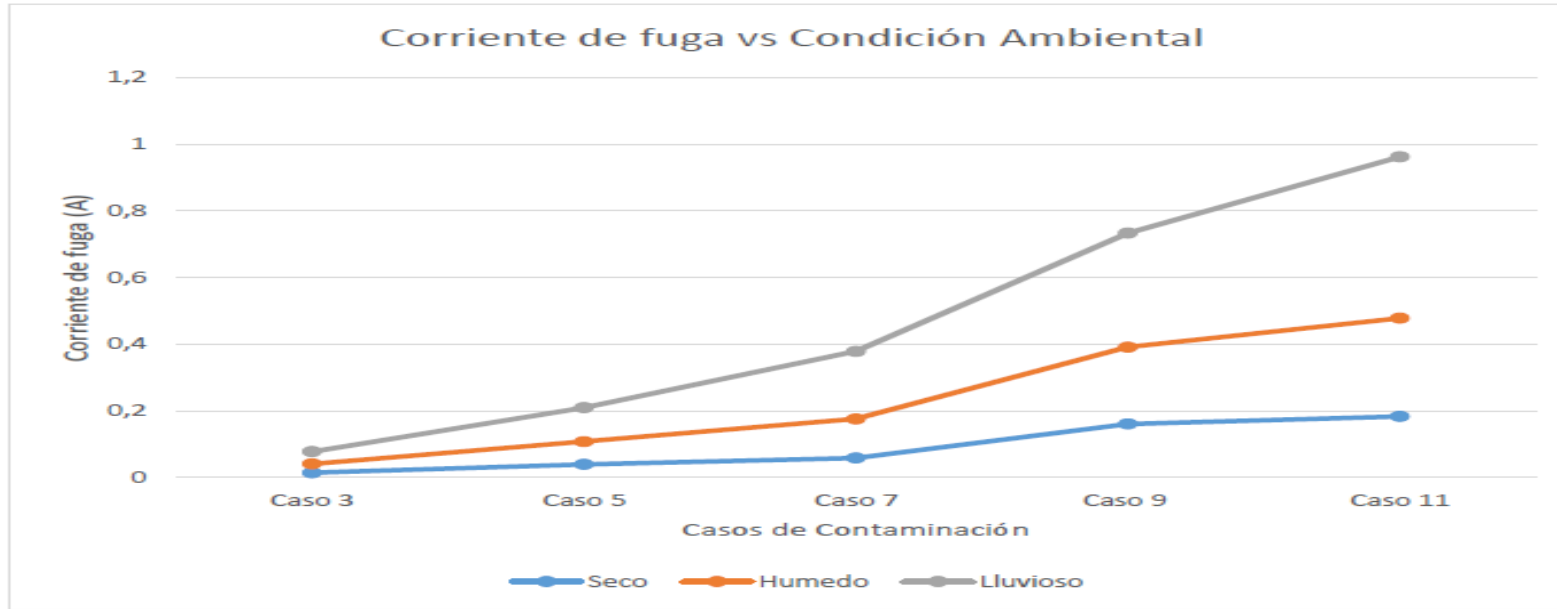


Análisis

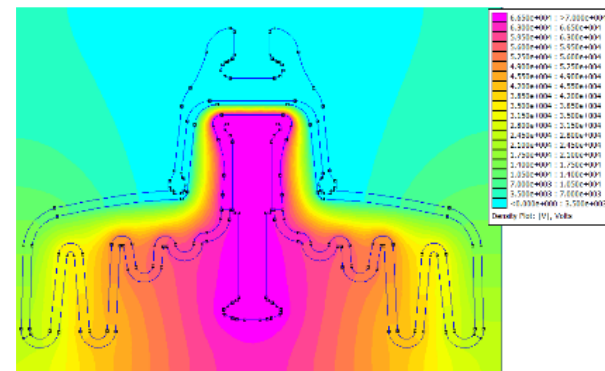


Análisis

Influencia de la contaminación ambiental en la corriente de fuga



a)

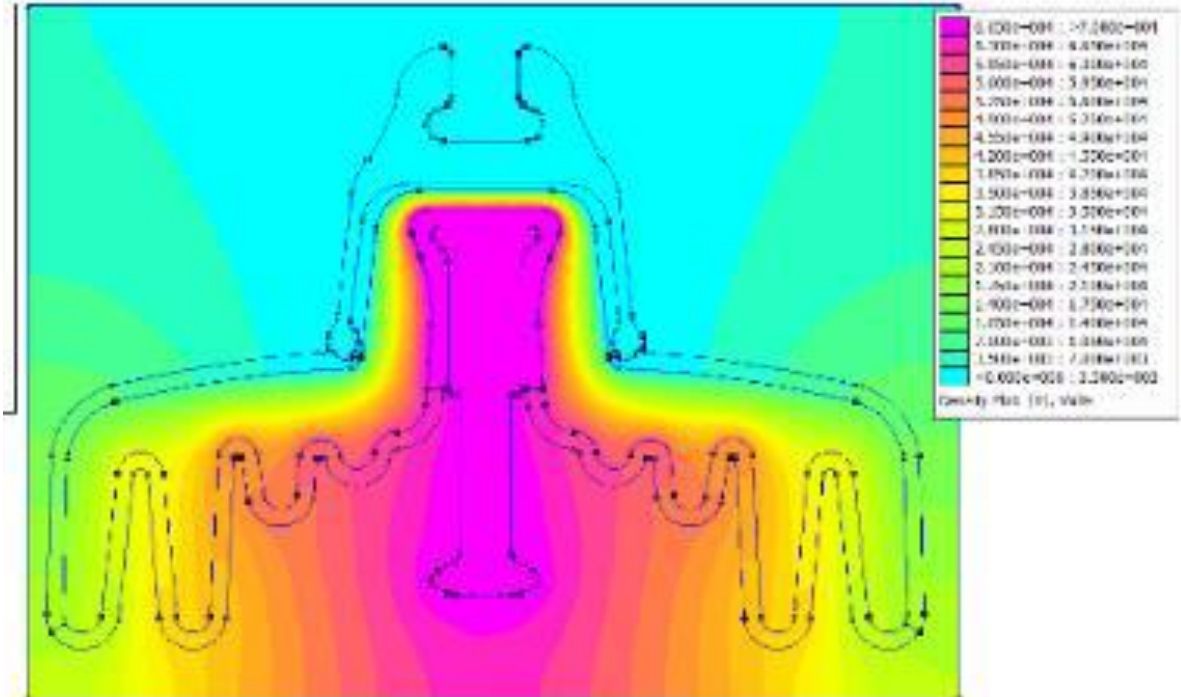
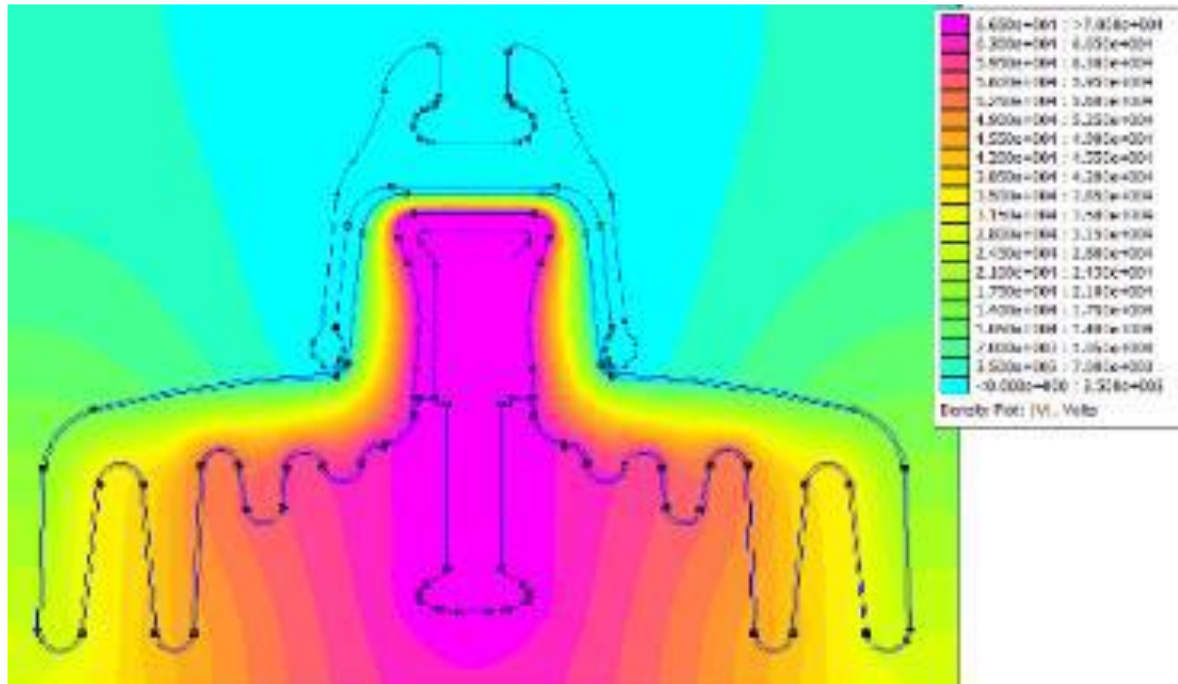


c)



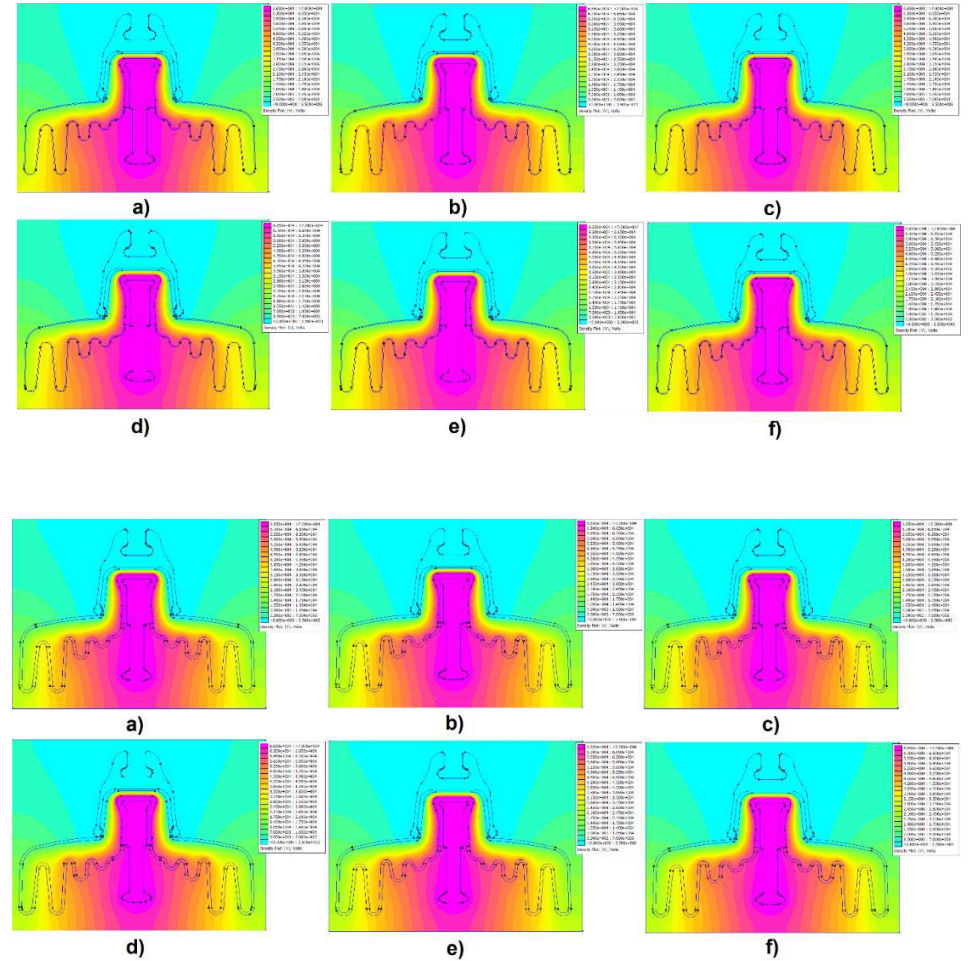
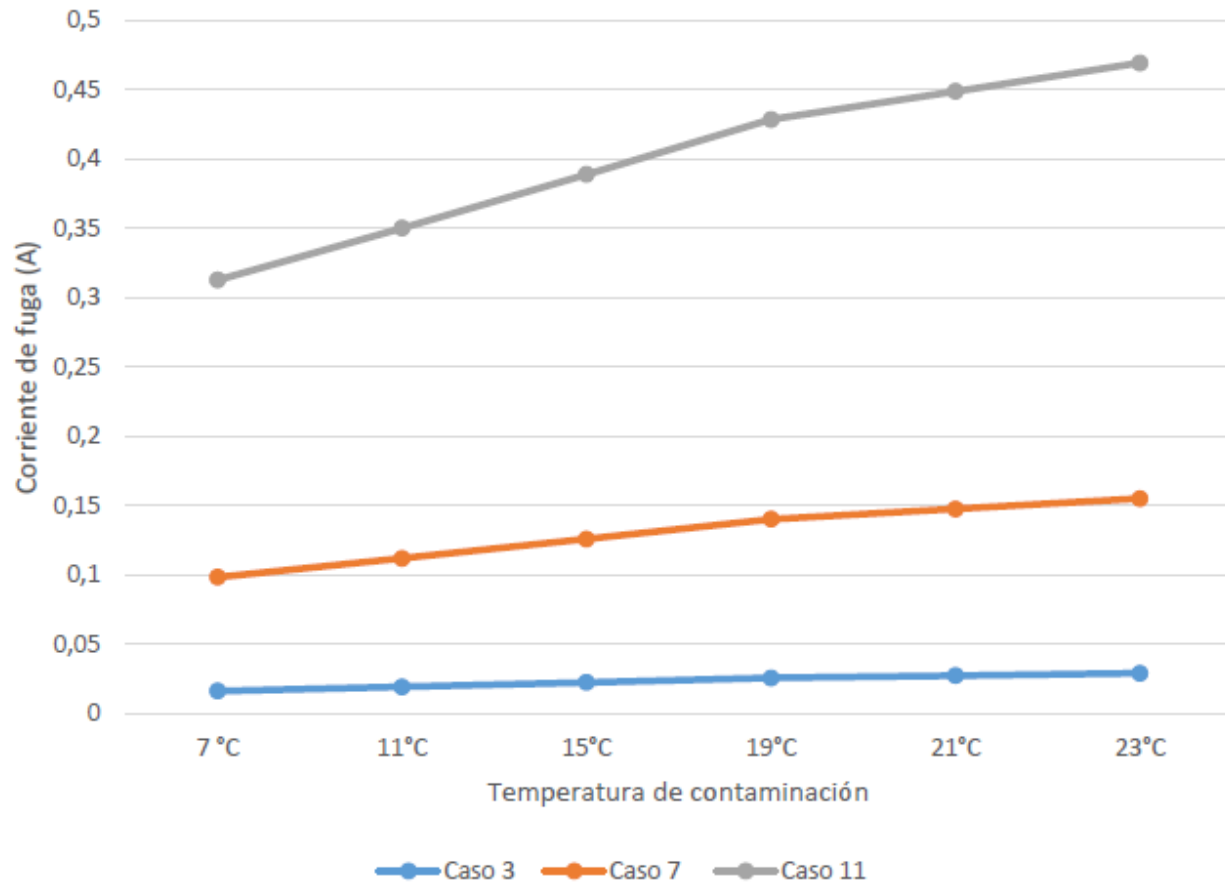
Análisis

Influencia de la temperatura del contaminante en la corriente de fuga



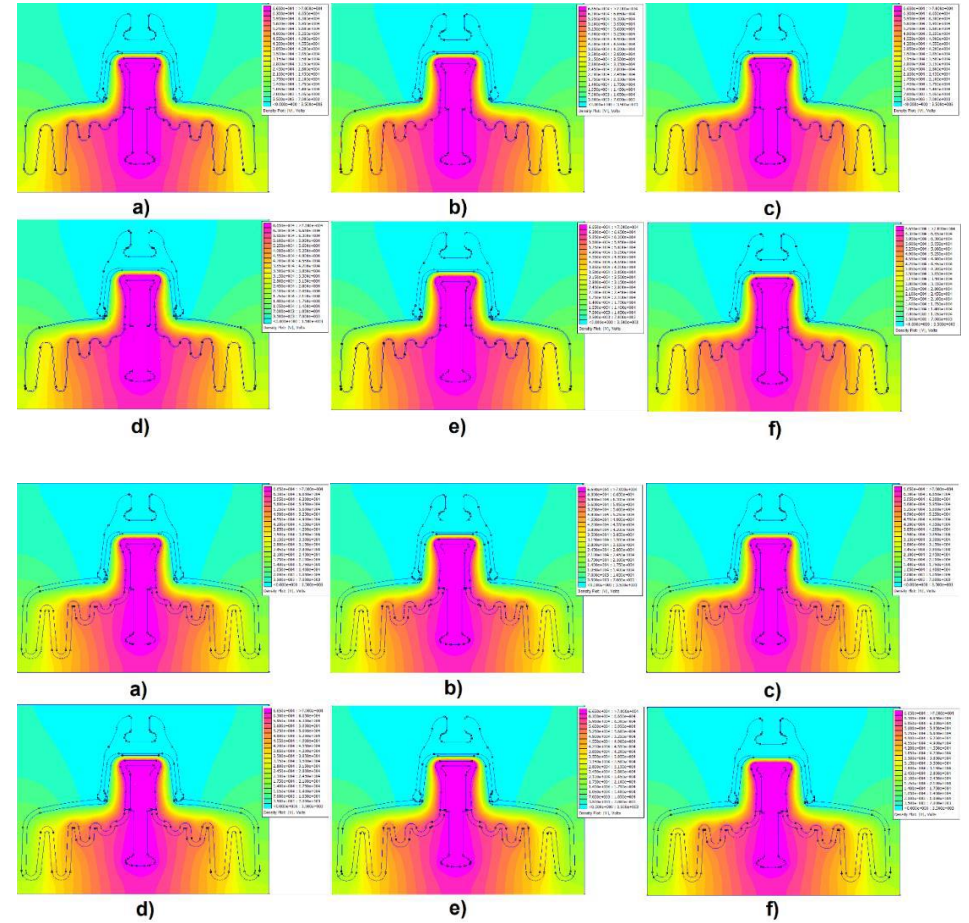
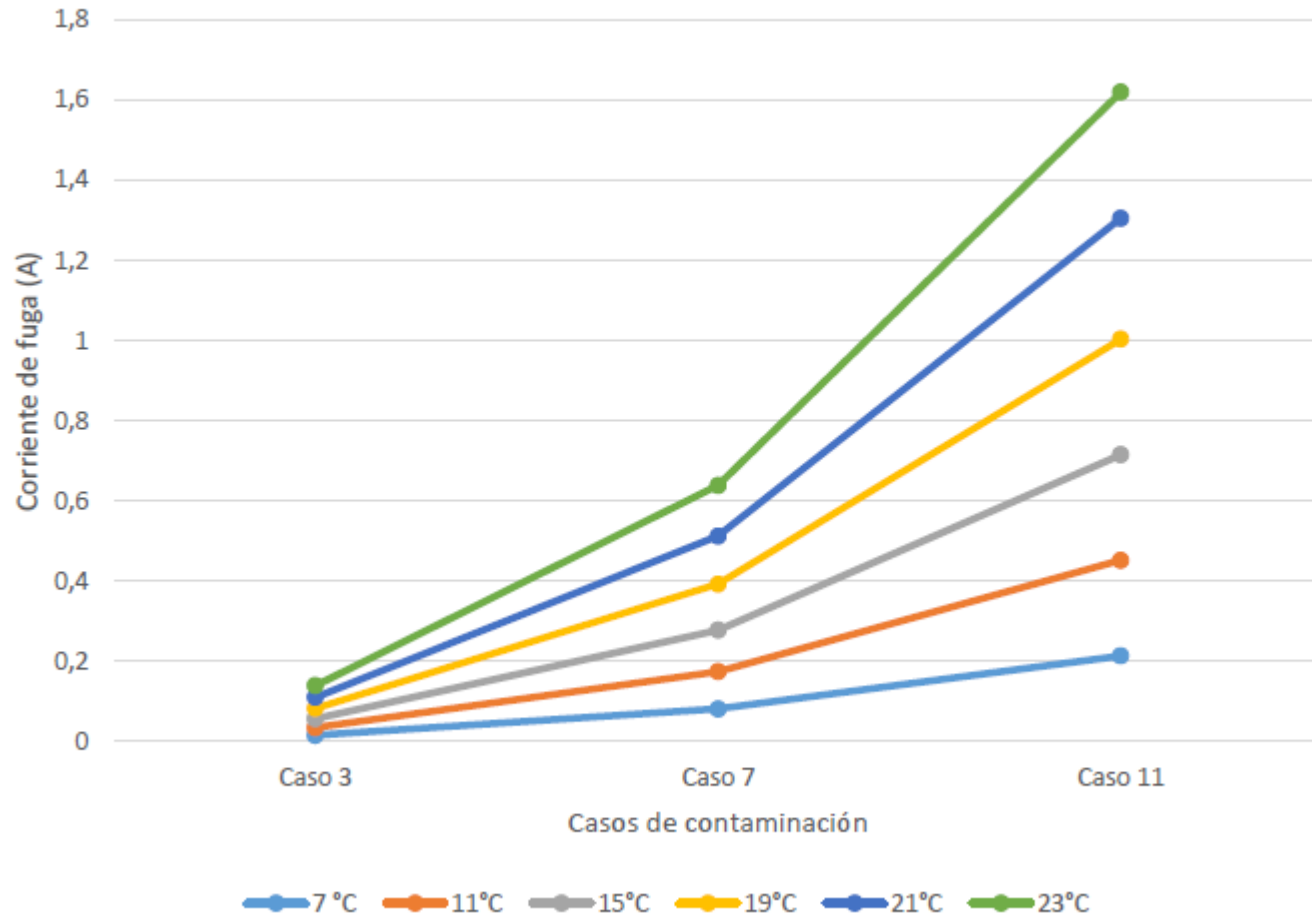
Análisis

Corriente de fuga vs temperatura de contaminación

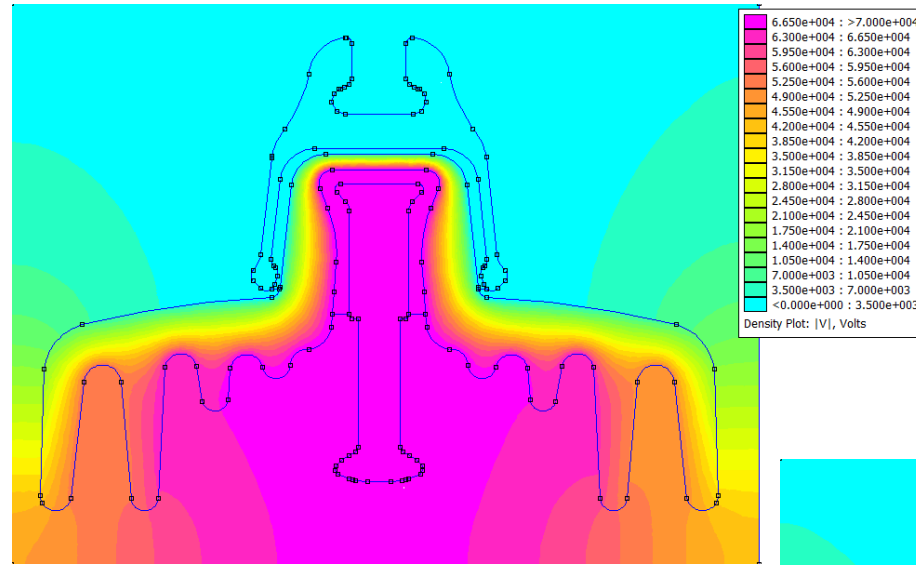
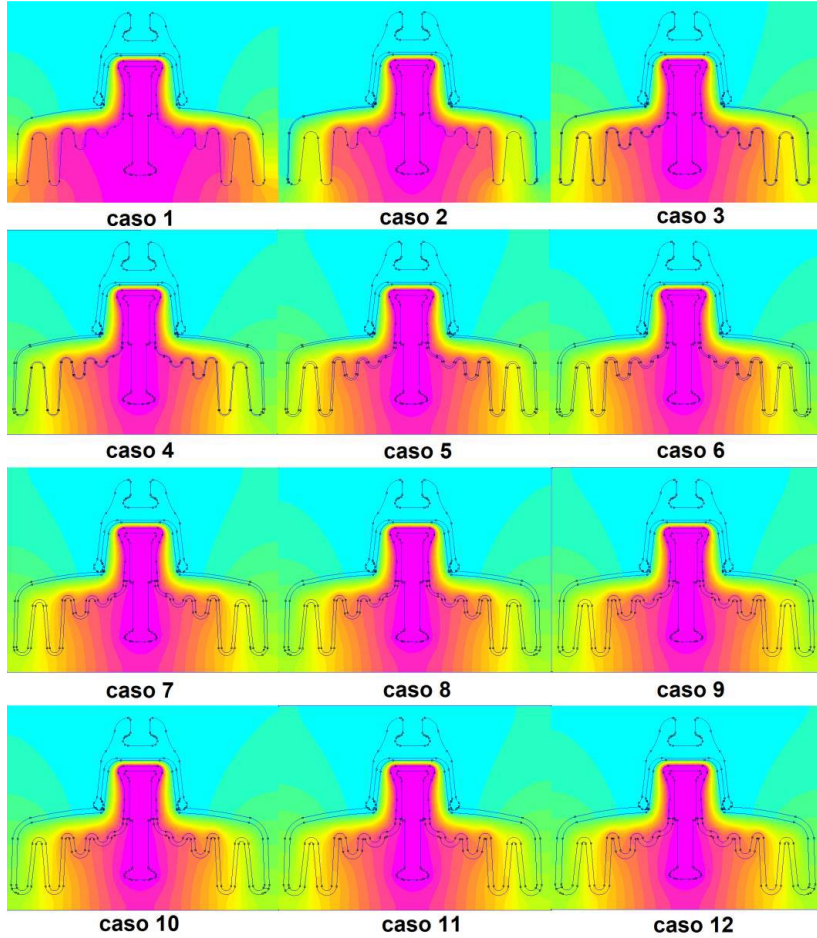


Análisis

Corriente de fuga vs Contaminación

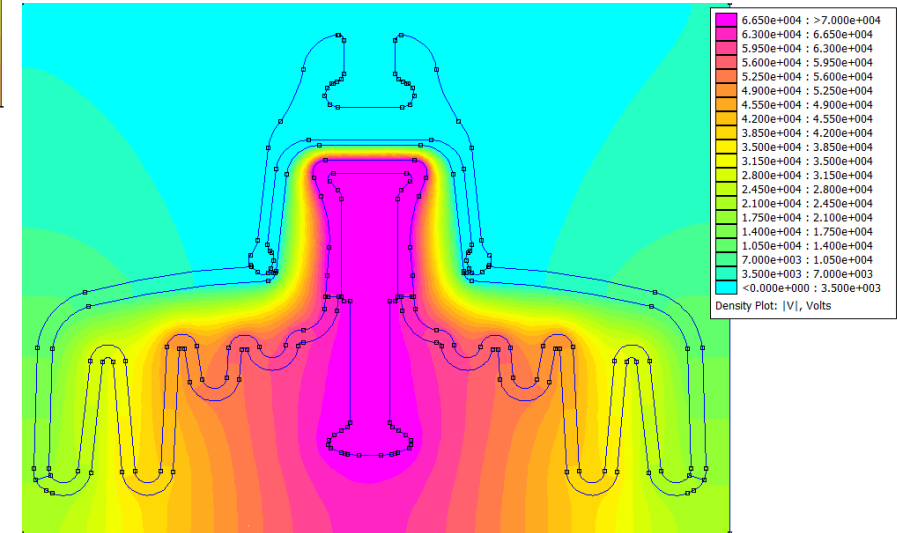


Análisis



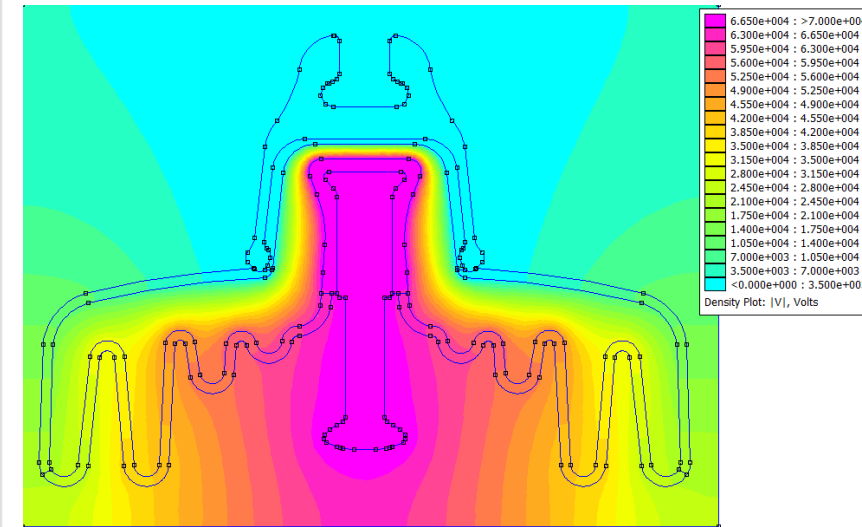
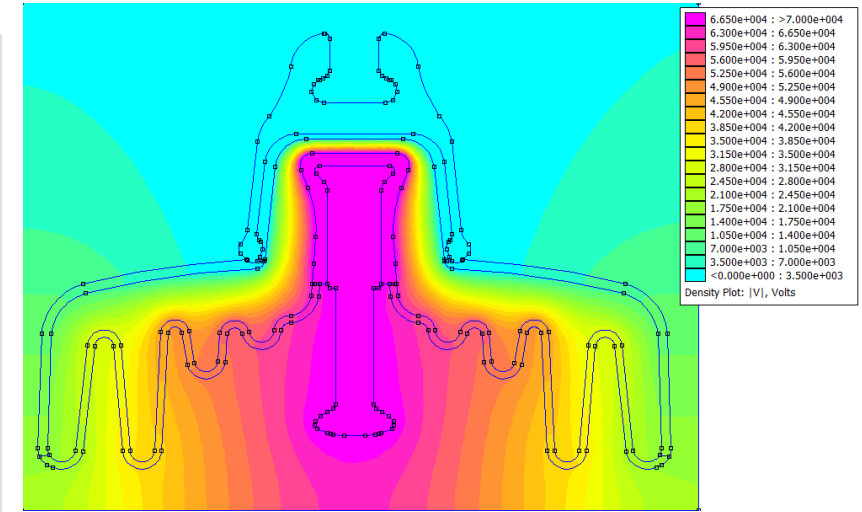
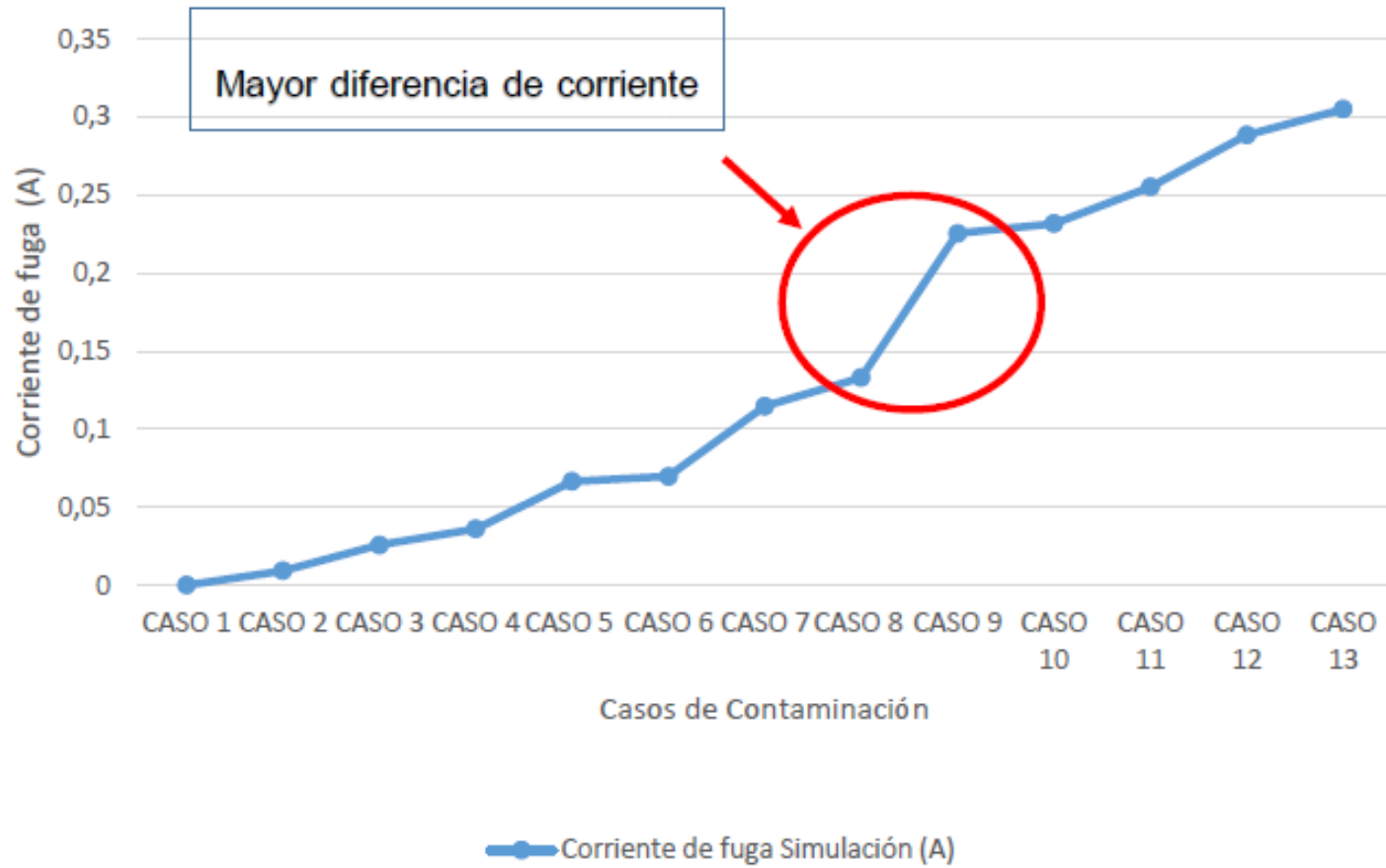
CASO 1

CASO 12

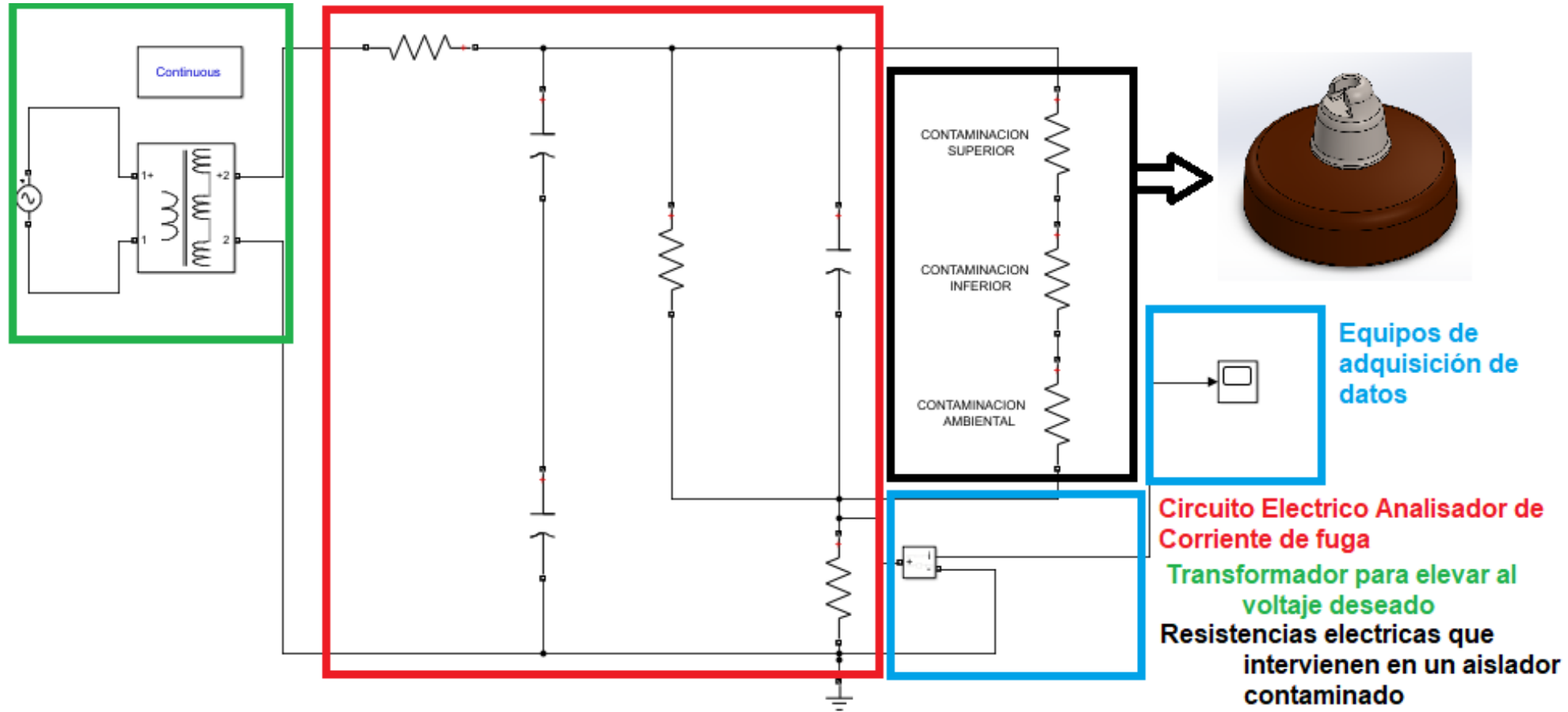


Análisis

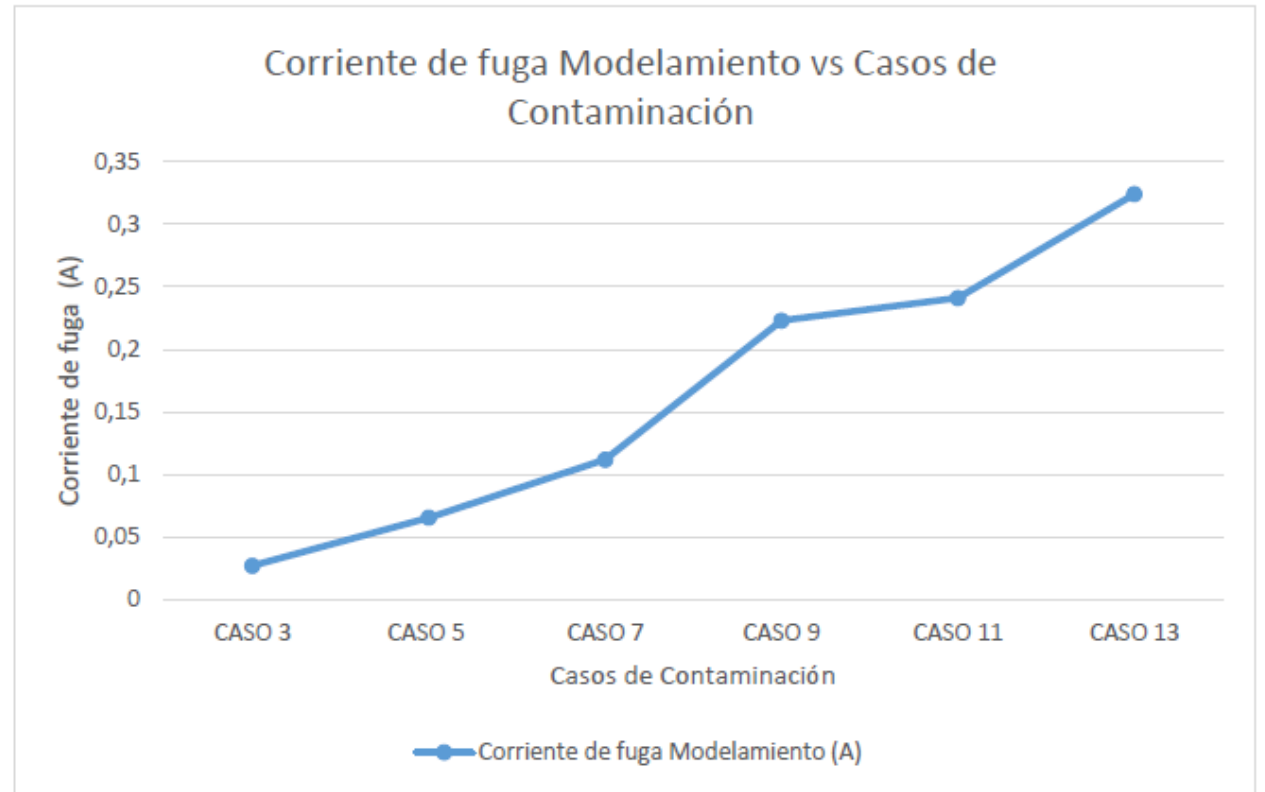
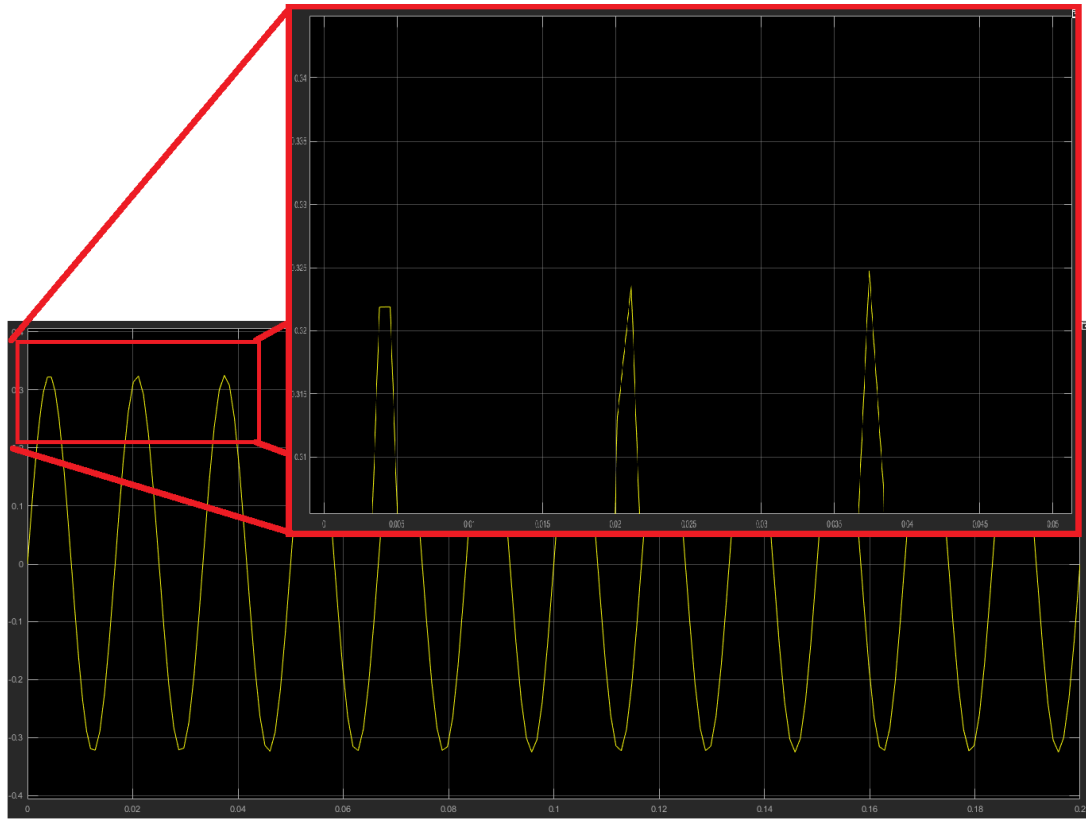
Corriente de fuga Simulación vs Casos de Contaminación



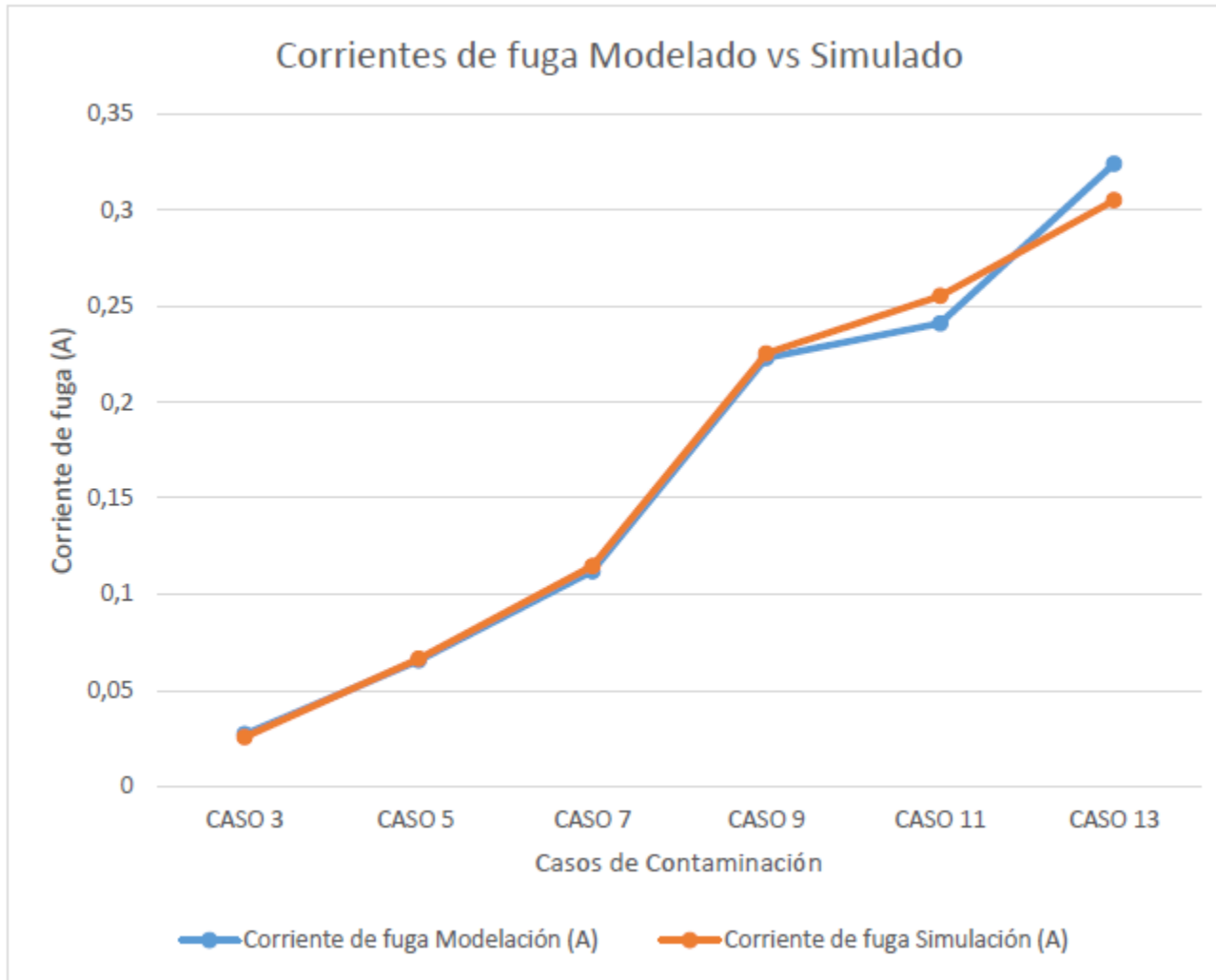
Análisis



Análisis



Análisis



CASOS	CONTAMINACIÓN (mm)	CORRIENTE DE FUGA MODELACIÓN (A)	CORRIENTE DE FUGA SIMULACIÓN (A)	DIFERENCIA DE CORRIENTE (A)
3	SUPERIOR	1 0,0272	0,0256	0.0016
	INFERIOR	1		
5	SUPERIOR	2 0,0655	0,0664	0.0009
	INFERIOR	2		
7	SUPERIOR	3 0,112	0,114	0.002
	INFERIOR	3		
9	SUPERIOR	4 0,223	0,225	0.002
	INFERIOR	4		
11	SUPERIOR	5 0,241	0,255	0.014
	INFERIOR	5		
13	SUPERIOR	6 0,324	0,305	0.019
	INFERIOR	6		



Análisis

$$E_p > E_{arc}$$

$$V_p = xE_p$$

$$E_p = \frac{U_{p_m}}{L - x} = \frac{r_a(L - x)I_m}{L - x} = r_a I_f$$

$$V_{arc} = xE_{arc}$$

$$E_{arc} = \frac{U_{arc_m}}{x} = \frac{AxI_m^{-n}}{x} = AI_f^{-n}$$

$$V_p > V_{arc}$$

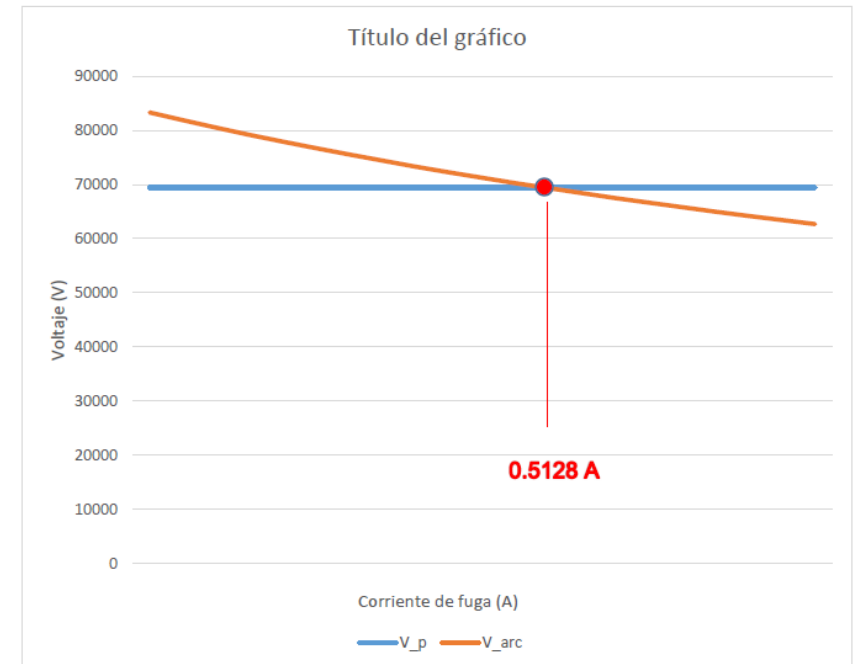


Análisis

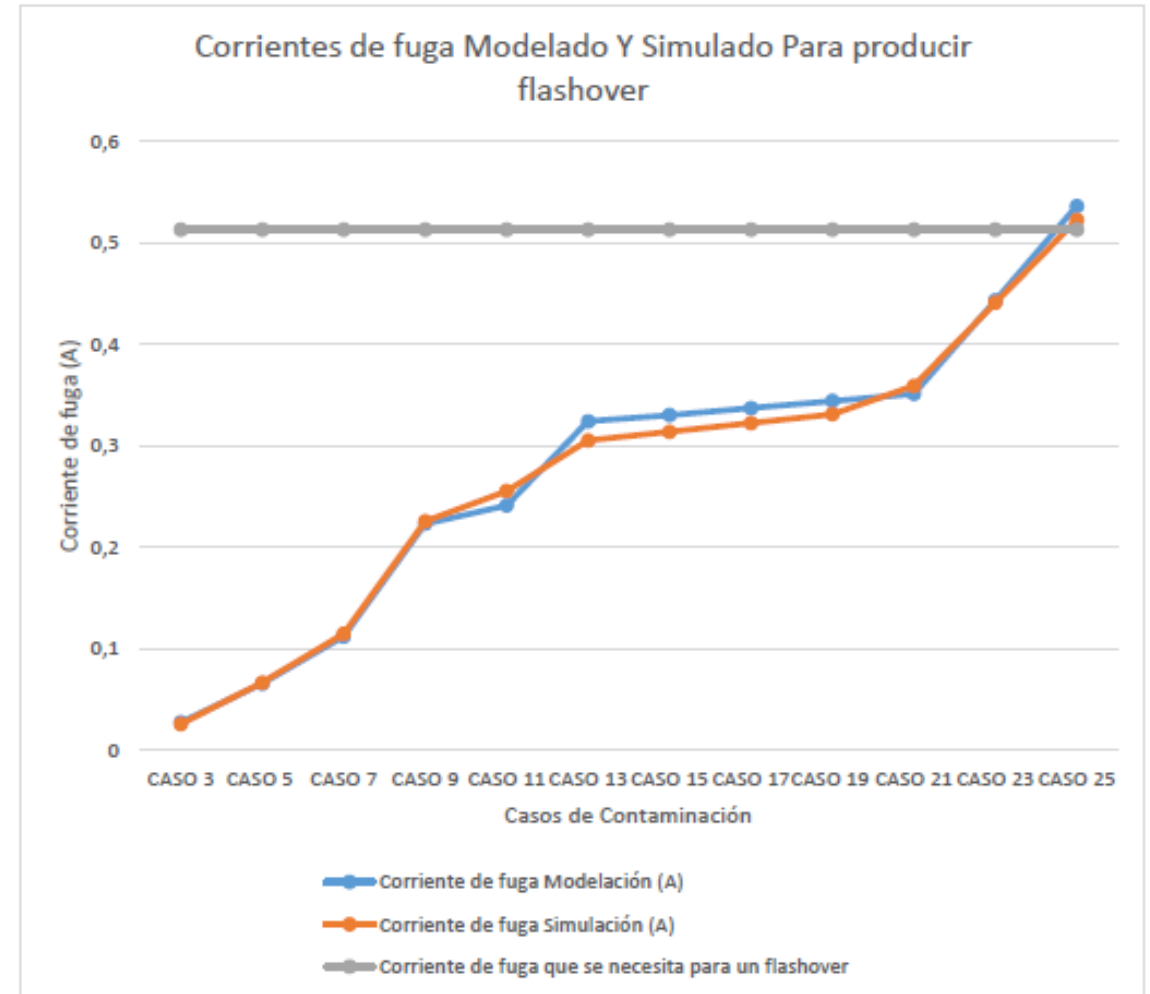
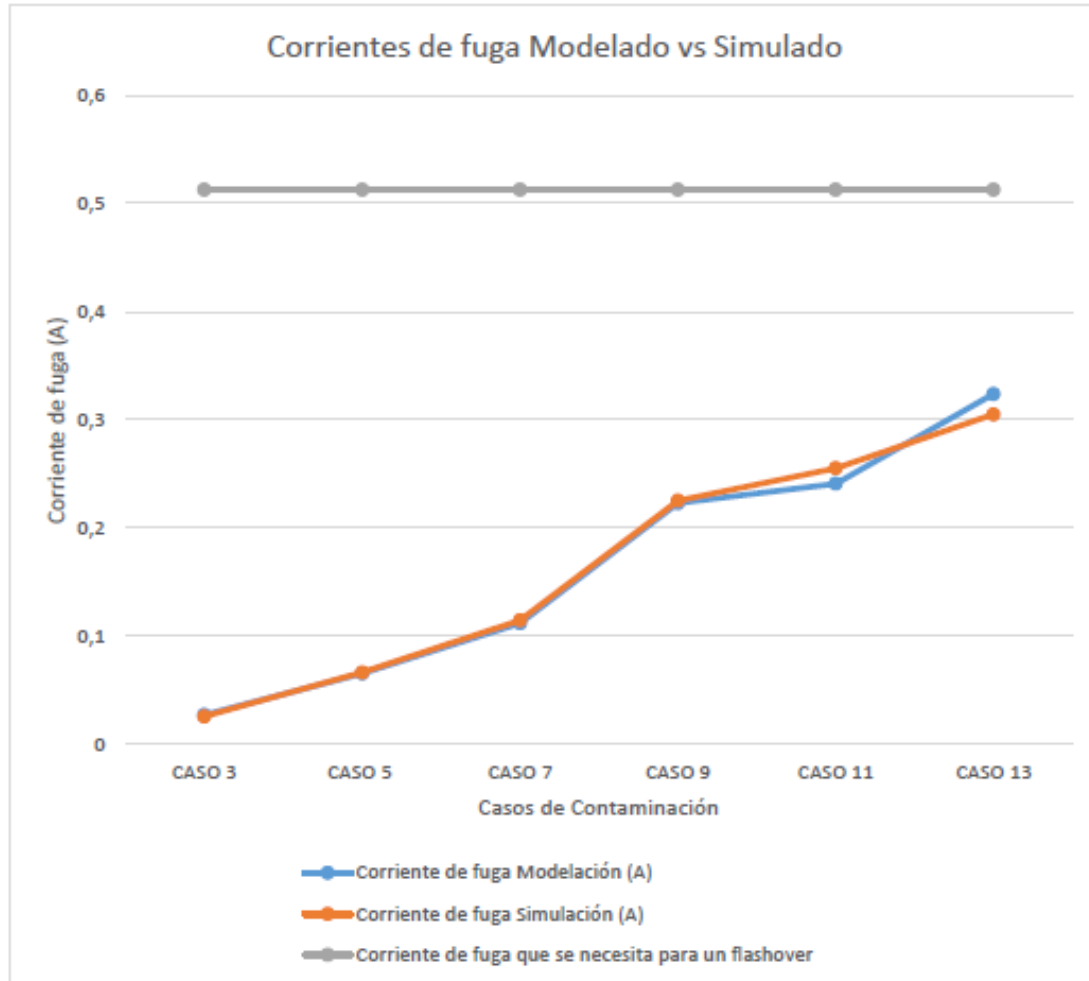


$$V_{arc} = 102 * 430 * I_f^{-0.7}$$

$$69466,1507 \text{ V} > 102 * 430 * I_f^{-0.7}$$

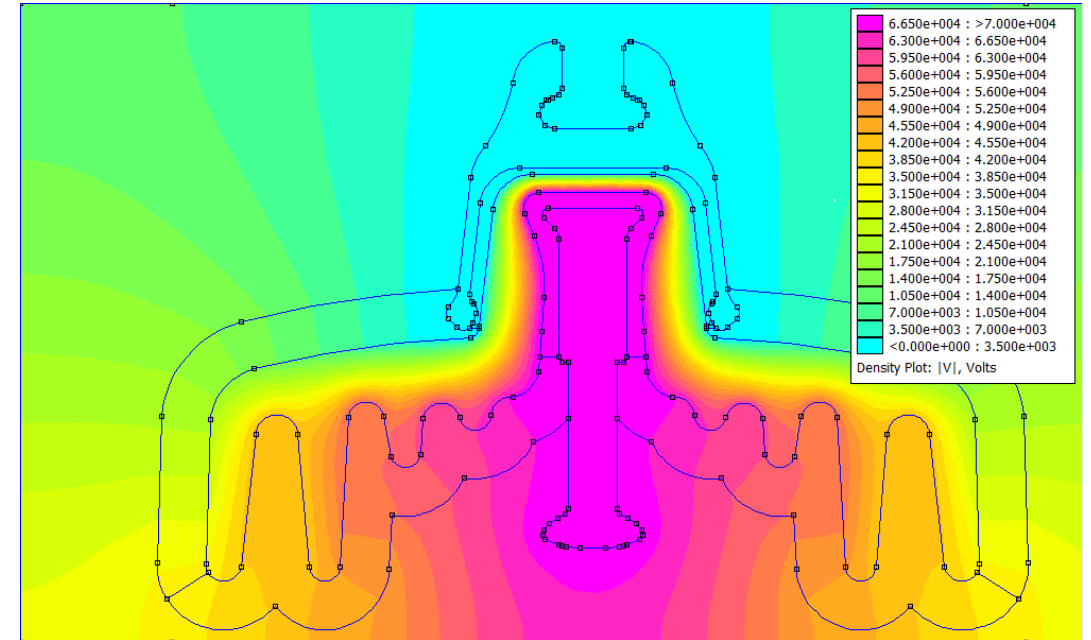
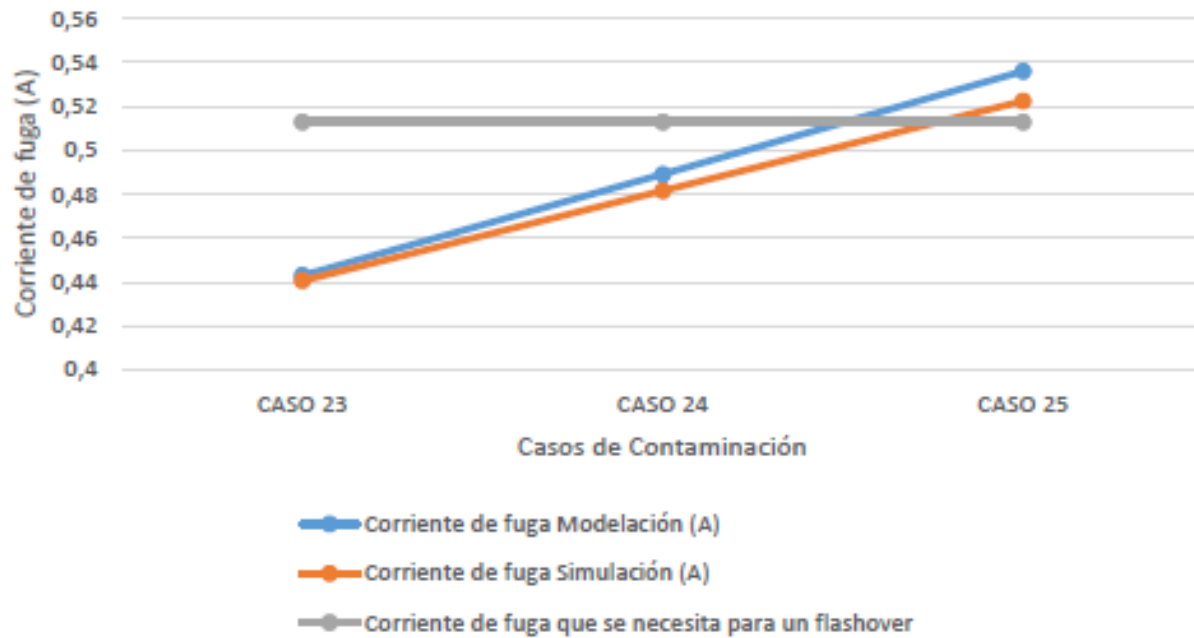


Análisis

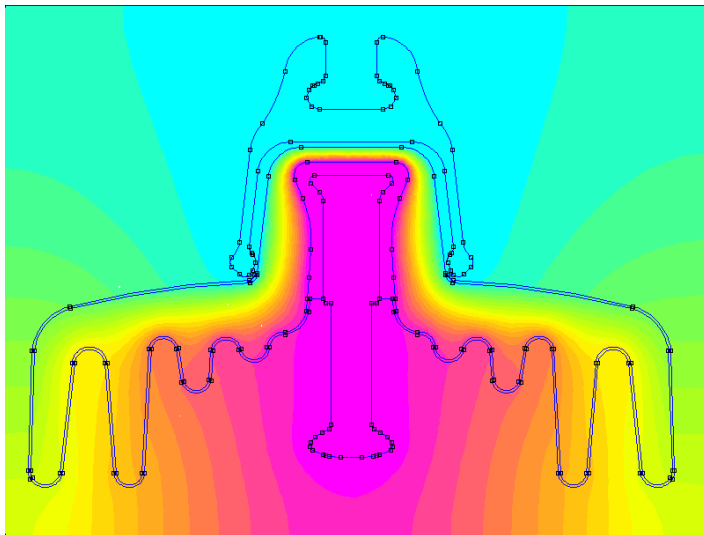


Análisis

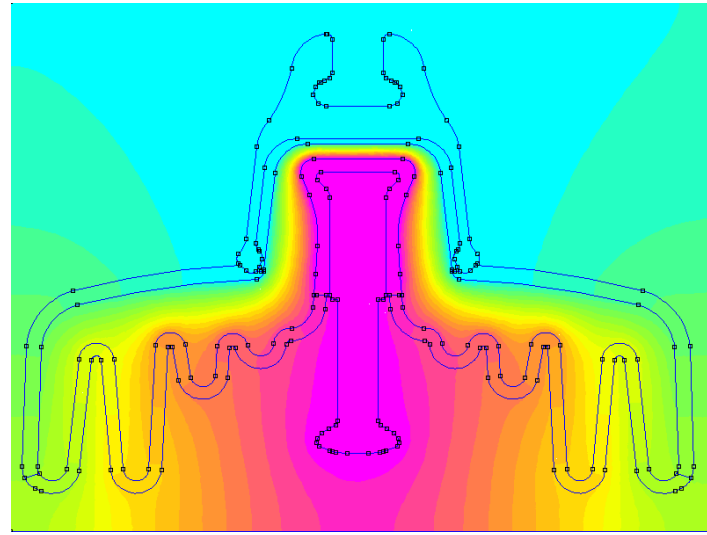
Corrientes de fuga Modelado Y Simulado Para producir flashover



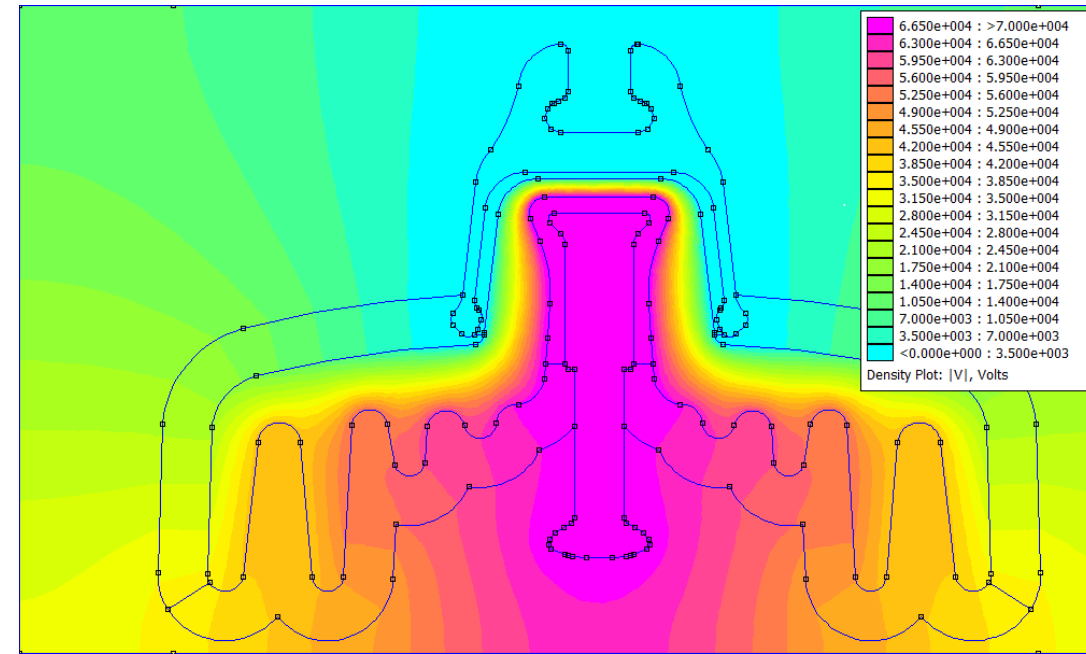
Análisis



CASO 3



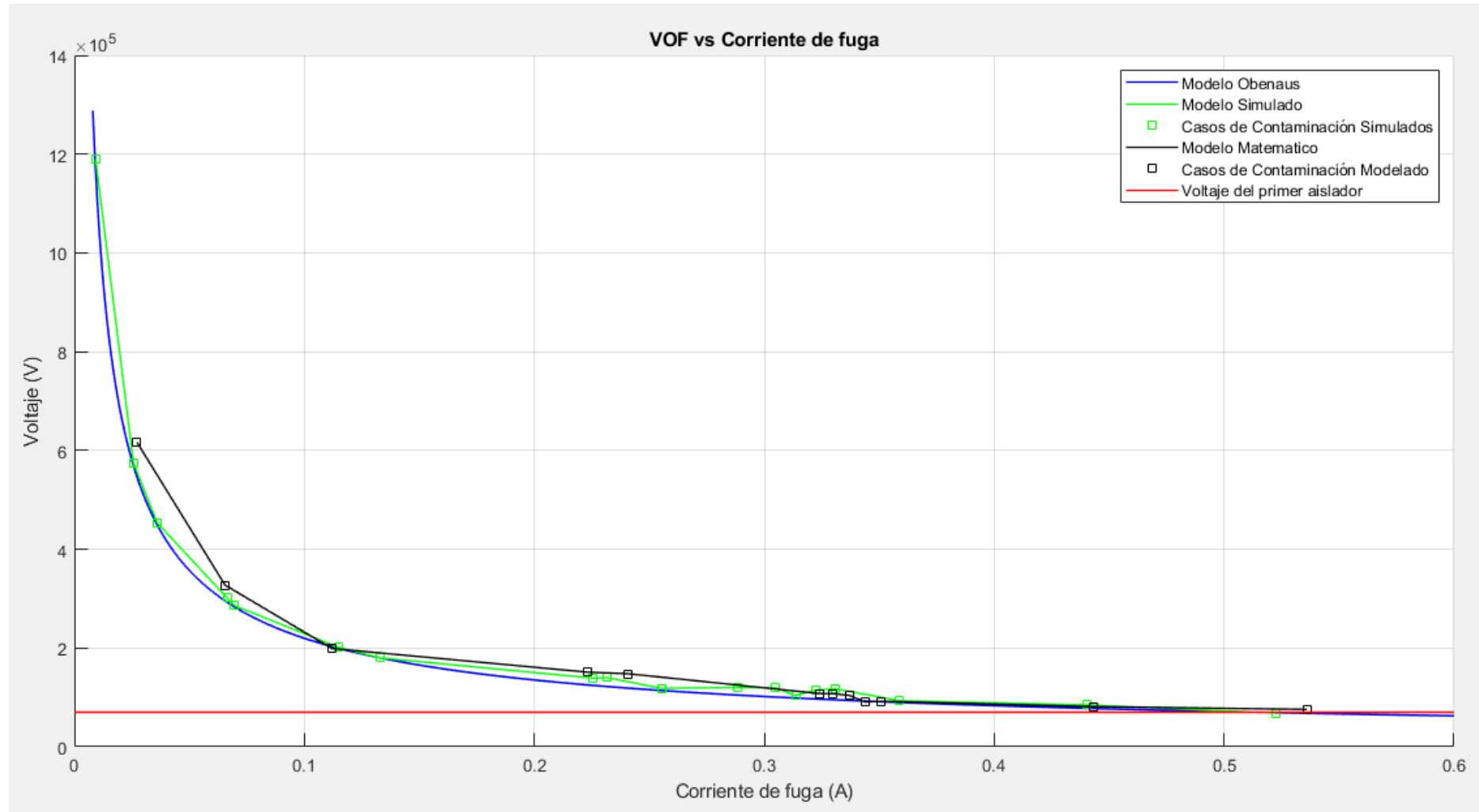
CASO 12



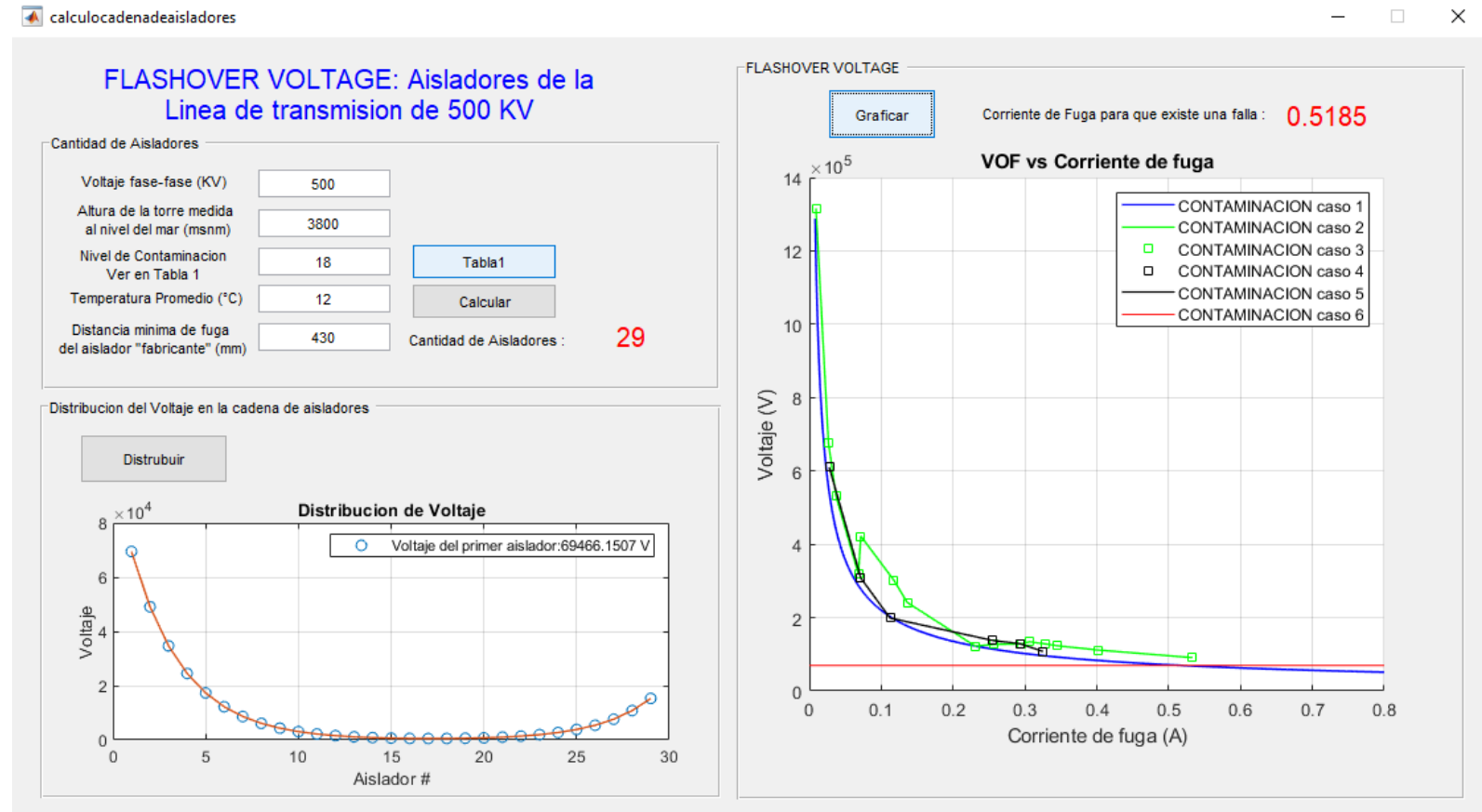
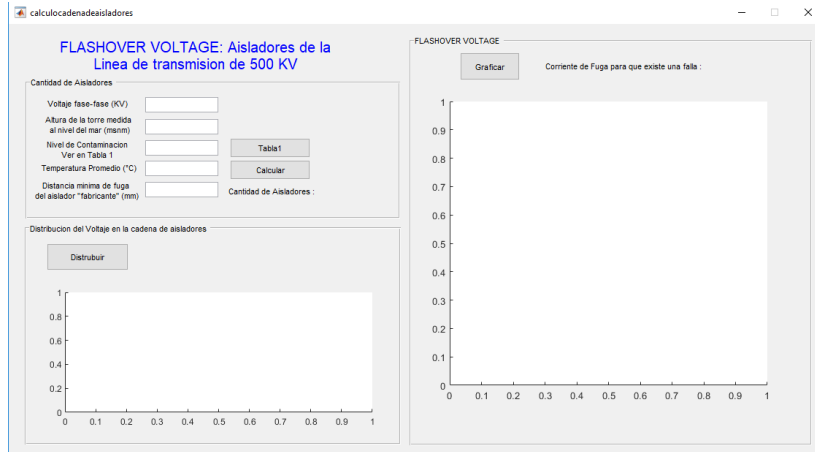
CASO 25



Análisis



Análisis



Conclusiones

- Se realizó un análisis matemático del efecto “flashover voltage” mediante la condición que el gradiente de contaminación debe superar el gradiente de arco que se encuentran en función de la corriente de fuga en el aislador ANSI tipo B C29.2-52-3 FOG cerámico. obteniéndose una corriente de fuga superior a 0.5128 amperios que es la que produce un el fallo en el sistema.
- Se simularon diferentes casos de contaminación mediante el software FEMM en el aislador ANSI tipo B C29.2-52-3 FOG cerámico dando como resultado que la contaminación depende mucho de condiciones ambientales ya que estas cambiar las características dieléctricas, aumentando o disminuyendo su conductividad dependiendo el caso.
- La contaminación con ceniza volcánica sobre los aisladores por sí sola no ocasiona ningún efecto en la generación o aumento de corriente de fuga al contrario en ciertas ocasiones aumenta su resistividad haciendo que el aislador mejore sus características dieléctricas.
- Se analizó el efecto “flashover voltage” solamente en condiciones de humedad ya que en seco el aislador no produce un gran cambio en su corriente de fuga, mientras que en condiciones de lluvia los aisladores están diseñado para limpiarse de contaminantes por si solos.



Conclusiones

- El aislador ANSI tipo B C29.2-52-3 FOG contaminado con espesor de 12mm en su parte superior e inferior, con ceniza volcánica produce “flashover voltage” ya que su corriente de fuga de 0.536 amperios supera la corriente de fuga de 0.5128 amperios que es la que produce un el fallo en el sistema..
- Se diseñó un programa en Matlab que permite visualizar y analizar el efecto “flashover voltage” en el aislador, así como también los parámetros que se deben analizar previamente como en función de la cadena de aisladores.



Recomendaciones

- Realizar una simulación CDF de la distribución de ceniza en cadena de aisladores de suspensión como de retención para poder simular casos más reales de contaminación.
- Implementar un programa a la par que permita visualizar el nivel de contaminación como las condiciones ambientales para poder tener datos en tiempo real.
- Realizar una cámara de pruebas de contaminación en la Universidad de las Fuerzas Armadas extensión Latacunga para poder realizar pruebas físicas no solo de aisladores sino también de contaminación en las líneas eléctricas, transformadores y demás elementos de protección y aislamiento eléctrico.



GRACIAS POR SU ATENCIÓN



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA