# ESTUDIO TERMO-ELÉCTRICO DE LA DISRUPCIÓN ELÉCTRICA EN ARENA BAJO IMPULSOS TIPO RAYO

**EDISSON JAVIER RINCON AVILA**
**Ingeniero Electricista**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA**
**FACULTAD DE INGENIERÍA**
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**
**BOGOTÁ**
**2010**

# ESTUDIO TERMO-ELÉCTRICO DE LA DISRUPCIÓN ELÉCTRICA EN ARENA BAJO IMPULSOS TIPO RAYO

**EDISSON JAVIER RINCON AVILA**
**CODIGO: 298315**

Trabajo presentado para optar
al título de Magíster en Ingeniería Eléctrica

DIRIGIDO POR:
**ANTONIO JOSE MEJÍA UMAÑA**
**I.E.,M.Sc.,Ph.D.**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA**
**FACULTAD DE INGENIERÍA**
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**
**BOGOTÁ**
**2010**

A Dios, por permitirme vivir tantos momentos felices en mi vida.
A mi madre Cecilia, porque siempre esta mi lado, apoyándome y dándome fuerza para conseguir estos éxitos tan importantes.
A ti, por se mi novia, amiga y compañera durante estos últimos años

**AGRADECIMIENTOS**

El autor expresa sus más sinceros agradecimientos a:

El Ingeniero Antonio Mejía por su tiempo y paciencia, sus valiosos aportes y asesorías fueron claves para la culminación exitosa de esta Investigación.

A mi familia, amigos y seres queridos.

## CONTENIDO


| | | |
|---|---|---|
| INTRODUCCION | | 8 |
| 1 | EL SUELO | 10 |
| 1.1 | COMPORTAMIENTO DEL SUELO ANTE DESCARGAS DE ENERGIA ELECTRICA | 11 |
| 1.2 | DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO DE LA DESCARGA ELÉCTRICA EN ARENA BAJO IMPULSOS TIPO RAYO. | 11 |
| 2 | MECANISMO TERMICO DE INICIO DE LA DESCARGA. | 14 |
| 2.1 | SIN CONSIDERAR EL MEDIO CIRCUNDANTE | 15 |
| 2.2 | CONSIDERANDO EL MEDIO CIRCUNDANTE | 17 |
| 3 | MODELOS ELÉCTRICOS DESAROLLADOS ACERCA DEL FENÓMENO ESTUDIADO | 20 |
| 3.1 | MODELO LIEW AND DARVENIZA (MODELO ELÉCTRICO) | 20 |
| 3.1.1 | Modelo aplicado para determinar el comportamiento de la resistencia de un electrodo concentrado de puesta a tierra | 22 |
| 3.1.1.1 | Resistencia de no descarga | 22 |
| 3.1.1.2 | Resistencia de descarga | 23 |
| 3.2 | MODELO ELÉCTRICO LIEW-DARVENIZA APLICADO A UNA CONFIGURACIÓN DE UN ARREGLO CILÍNDRICO COAXIAL. | 26 |
| 3.3 | MODELO PINEDA | 27 |
| 3.3.1 | CONFIGURACIÓN UTILIZADA PARTE EXPERIMENTAL | 28 |
| 3.3.2 | Modelo eléctrico aproximado de las pruebas de laboratorio considerando la expansión del electrodo interno. | 29 |
| 3.3.3 | MODELO 2: Modelo exponencial | 33 |
| 4 | SIMULACIÓN MODELO VERNON COORAY PARA UN ELECTRODO CONCENTRADO DE PUESTA A TIERRA | 35 |
| 4.1 | SIMULACION | 40 |
| 5 | PROPUESTA DE MODELO TERMOELECTRICO PARA LA DESCARGA EN ARENA BAJO IMPULSOS TIPO RAYO EN LA CONFIGURACIÓN DE DOS ELECTRODOS CILINDRICOS COAXIALES. | 42 |
| 6 | RESULTADOS MODELO TERMO-ELECTRICO DE LA DESCARGA ELECTRICA EN ARENA BAJO IMPULSOS TIPO RAYO. | 46 |
| 6.1 | SIMULACIONES | 46 |
| 6.1.1 | Contenido de humedad CH=3% voltaje aplicado 60kV | 46 |
| 6.1.2 | Contenido de humedad CH=3% voltaje aplicado 80kV | 47 |
| 6.1.3 | Contenido de humedad CH=3% voltaje aplicado 120kV | 47 |
| 6.1.4 | Contenido de humedad CH=6% voltaje aplicado 50kV | 48 |
| 6.1.5 | Contenido de humedad CH=6% voltaje aplicado 80kV | 49 |
| 6.1.6 | Contenido de humedad CH=6% voltaje aplicado 120kV | 49 |
| 6.1.7 | Contenido de humedad CH=9% voltaje aplicado 90kV | 50 |
| 6.1.8 | Contenido de humedad CH=9% voltaje aplicado 120kV | 50 |
| 6.1.9 | Contenido de humedad CH=12% voltaje aplicado 70kV | 51 |

6.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS 52
6.2.1 Obtención de la variable F a partir de CH 53
6.2.2 Obtención de la resistividad de la arena a partir de CH. 53
6.2.3 Obtención de Rmin a partir del voltaje aplicado. 53
6.2.4 Obtención de S. 54
6.3 EJEMPLO SIMULACION A PARTIR DEL MODELO. 54
DISCUSION, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 57
BIBLIOGRAFIA 60
ANEXOS 62
ANEXO A. CODIGO SIMULACIÓN RESISTENCIA DINAMICA DEL SUELO (MODELO COORAY) 62
ANEXO B. CODIGO SIMULACIÓN RESISTENCIA DINAMICA DE LA ARENA EN LA CONFIGURACIÓN DE DOS ELECTRODOS CILINDRICOS COAXIALES. 64

## LISTA DE FIGURAS


FIGURA 1: REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA POR VOLUMEN DEL SUELO DE TEXTURA MEDIA 10

FIGURA 2: CURVAS TÍPICAS PARA EL VOLTAJE, LA CORRIENTE Y LA IMPEDANCIA DEL FENÓMENO DE DESCARGA EN SUELOS 12

FIGURA 3: CANALES FORMADOS DE AGUA 14

FIGURA 4: TEMPERATURA DEL CILINDRO DE AGUA SIN CONSIDERAR EL MEDIO CIRCUNDANTE 16

FIGURA 5: VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL CILINDRO DE AGUA CONSIDERANDO EL MEDIO CIRCUNDANTE 18

FIGURA 6: PERFIL DE RESISTIVIDAD. 22

FIGURA 7: SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES 23

FIGURA 8: REGIONES SEGÚN MODELO LIEW Y DARVENIZA 25

FIGURA 9: PARÁMETROS UTILIZADOS EN EL MODELO DINÁMICO LIEW-DARVENIZA 26

FIGURA 10: RESISTENCIA DEL OBJETO DE PRUEBA Y RADIO ALCANZADO POR LA DESCARGA. 27

FIGURA 11: CONFIGURACIÓN ANALIZADA EN EL LABORATORIO 28

FIGURA 12: RELACION V/I, I/V ENCONTRADA EN EL LABORATORIO, NIVEL DE HUMEDAD 3% 29

FIGURA 13: CONFIGURACIÓN MODELO PEDRO PINEDA 31

FIGURA 14: CURVA EXPERIMENTAL 31

FIGURA 15: MODELO ELÉCTRICO EXPONENCIAL DE CONSTANTES DE TIEMPO. 32

FIGURA 16: COMPARACIÓN MODELOS 34

FIGURA 17: SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES ALREDEDOR DE LA VARILLA ENTERRADA. 36

FIGURA 18: CORRIENTE INYECTADA 41

FIGURA 19: RESULTADO OBTENIDO MODELO 41

FIGURA 20: SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES ENTRE LOS CONDUCTORES COAXIALES 43

FIGURA 21: COMPARACIÓN V/I CALCULADA VS EXPERIMENTAL, 60KV, 3% 47

FIGURA 22: COMPARACIÓN V/I CALCULADA VS EXPERIMENTAL, 80KV, 3% 47

FIGURA 23: COMPARACIÓN V/I CALCULADA VS EXPERIMENTAL, 120KV, 3% 48

FIGURA 24: COMPARACIÓN V/I CALCULADA VS EXPERIMENTAL, 50KV, 6% 48

FIGURA 25: COMPARACIÓN V/I CALCULADA VS EXPERIMENTAL, 80KV, 6% 49

FIGURA 26: COMPARACIÓN V/I CALCULADA VS EXPERIMENTAL, 120KV, 6% 50

FIGURA 27: COMPARACIÓN V/I CALCULADA VS EXPERIMENTAL, 90KV,9% 50

FIGURA 28: COMPARACIÓN V/I CALCULADA VS EXPERIMENTAL, 120KV, 9% 51

FIGURA 29: COMPARACIÓN V/I CALCULADA VS EXPERIMENTAL, 70KV,12% 51

FIGURA 30: RESISTIVIDAD PARA DIFERENTES TIPOS DE HUMEDAD DE LA MUESTRA. 52

FIGURA 31: RESUMEN DE RESULTADOS 52

FIGURA 32: RESULTADO MODELO 56

# INTRODUCCION

El rápido cambio de la tecnología hace cada vez más importante el estudio de sistemas eléctricos, diariamente es necesario generar, transportar y distribuir grandes cantidades de energía eléctrica de y hacia diferentes sitios geográficos exigiendo contar con sistemas seguros y confiables, capaces de entregar un servicio de calidad y sin problemas que puedan incidir en interrupciones de procesos importantes de producción y supervivencia de las personas.

Los sistemas de energía eléctrica son altamente sensibles a cambios en sus estructuras y configuraciones, especialmente a cambios que involucran el comportamiento impredecible de elementos de tipo natural como el suelo. Esto ha generado gran incertidumbre en la actualidad, ya que por ejemplo no se sabe con certeza como diseñar sistemas de puesta a tierra óptimos que cumplan con los requerimientos exigidos, sin sobredimensionarlos y que puedan con total garantía proteger los equipos y la vida de las personas, es así que desde muchos años atrás se han estado realizando una serie de investigaciones encaminadas a encontrar un modelo que describa el complejo comportamiento del suelo ante descargas de alta energía, que explique los resultados experimentales que se han encontrado y que se base en principios físicos inherentes a este tipo de material, de esta forma se lograrán mejores diseños y se podrán encontrar nuevas aplicaciones que involucren este tipo de fenómeno. La tarea no ha sido fácil ya que el comportamiento del suelo ante descargas tipo rayo es un comportamiento dinámico que depende de muchos factores físicos, siendo uno de ellos la triple interfase que posee este tipo de material.

A nivel internacional no han sido pocos los esfuerzos por tratar de esclarecer este comportamiento, existen trabajos teóricos y experimentales que han ayudado a seguir avanzando en el estudio, se han planteado algunos modelos pero ninguno de ellos ha resultado determinante a la hora de explicar el fenómeno en su totalidad.

También en la Universidad Nacional se han realizado investigaciones teóricas y experimentales con el fin de conocer dicho comportamiento y conocer el efecto que tiene la ionización de los suelos sobre los valores de resistencia de puesta a tierra, estudios que han dado un gran aporte y ponen a esta institución como una de las más interesadas

en consolidar los estudios y construir un modelo que sea apropiado y tomado como base para dar un gran aporte a la ciencia internacional.

Este trabajo pretende precisamente dar un paso en firme a nivel nacional en la consecución de un modelo que involucre la parte eléctrica y térmica del fenómeno, basándose en trabajos experimentales ya realizados. En el primer capítulo se realiza una breve descripción de la composición del suelo y su comportamiento no lineal, luego en el segundo se realiza una síntesis de investigaciones que han involucrado la humedad del suelo como elemento determinante en el comportamiento del mismo. En el tercer capítulo se hace un análisis de los trabajos nacionales e internacionales ya realizados acerca del tema, luego en los siguientes y como parte principal de este trabajo se realiza la simulación del modelo térmico planteado por el científico Vernon Cooray para así finalmente encontrar un modelo termo-eléctrico que explique satisfactoriamente los resultados experimentales encontrados en la Universidad Nacional por el Ing. Pedro Pineda. Este modelo se basa en la explicación física dada por Cooray en su investigación

# 1 EL SUELO

El suelo está conformado por materia en estado sólido, líquido y gaseoso. La materia en estado sólido la conforman los diferentes minerales que contiene el suelo y algunos compuestos orgánicos. La materia en estado líquido corresponde al agua con diferentes tipos de sales disueltas. El aire y el vapor de agua constituyen la materia en estado gaseoso, la interacción de estas diferentes sustancias en sus diferentes fases hace que el comportamiento del suelo sea complejo, sin tener en cuenta los diferentes cambios físico-químicos que en el se dan gracias a la actividad de los seres vivos.

En la figura 1 se ilustra una simplificada representación esquemática de un suelo de textura media. Según la referencia [10] el 50% del volumen es materia sólida, siendo esta mineral y orgánica, dentro del otro 50% se encuentra agua y aire en proporciones del 25% y estos están presentes dentro de los espacios dejados por la parte solida del suelo. La flecha en la parte superior de la figura indica la variación que puede presentarse entre el contenido de agua y aire, indicando que el incremento de una cantidad está asociado con el decrecimiento de la otra

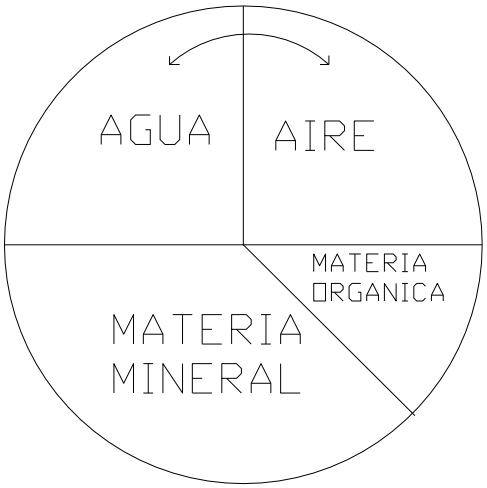



Figura 1: Representación esquemática por volumen del suelo de textura media
Fuente [10]

## 1.1 COMPORTAMIENTO DEL SUELO ANTE DESCARGAS DE ENERGIA ELECTRICA

Cuando la corriente de las descargas atmosféricas es conducida a tierra, la forma en que el sistema de puesta a tierra responde a esta corriente, es de vital importancia tanto para el control de los sobrevoltajes que puedan estar presentes en el sistema de potencia, como para la determinación de los niveles de protección adecuados de los descargadores de sobretensión en los sistemas de distribución. La respuesta del suelo a esta inyección de corriente es fuertemente dependiente de algunas variables como son el tipo de suelo, su conductividad eléctrica, el contenido de humedad, la capacidad térmica del medio, la geometría del electrodo y la magnitud y duración del impulso tipo rayo, entre otros factores. Se ha observado, que ante la presencia de ondas tipo rayo, la no linealidad de la impedancia del suelo es debida a fenómenos de ionización o descargas eléctricas presentes alrededor del electrodo, las cuales producen un decrecimiento apreciable en la impedancia de puesta a tierra del conjunto electrodo-suelo.

## 1.2 DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO DE LA DESCARGA ELÉCTRICA EN ARENA BAJO IMPULSOS TIPO RAYO.

En diferentes aplicaciones de diseño eléctrico la mayoría de las veces se utiliza un valor fijo de resistencia eléctrica del suelo, sin tener en cuenta los efectos de disrupción involucrados cuando se inyectan ondas tipo impulso o rayo dentro del sistema de puesta a tierra, varios estudios realizados por diferentes autores [11],[12],[13,[14] muestran que el comportamiento de los sistemas de puesta a tierra ante ondas de energía tipo impulso es no lineal, tratándose por décadas de llegar a una explicación física de este comportamiento se han realizado numerosos trabajos que nos acercan al modelo buscado. En este trabajo de investigación se plantea un modelo termoeléctrico que tiene en cuenta varios aspectos físicos que se involucran en este proceso dando una mirada hacia adelante y aprovechando el trabajo experimental que realizó el Ingeniero Pedro Pineda [8] en años anteriores. En la figura 2 se muestran unas curvas típicas del comportamiento del suelo ante impulsos de rayo, se destaca el comportamiento de la resistencia el cual presenta varios estados de disminución y recuperación de la resistencia en el tiempo, dicho comportamiento será el objeto de estudio de este trabajo de investigación.

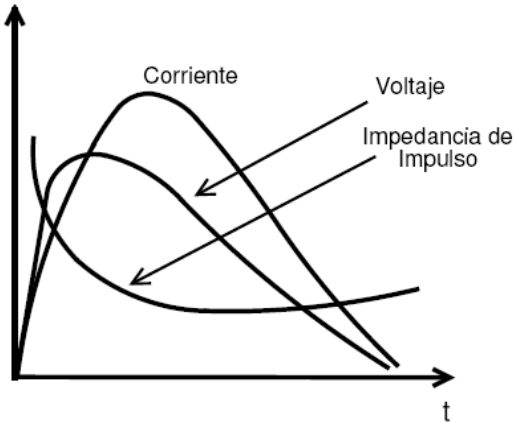



Figura 2: Curvas típicas para el voltaje, la corriente y la impedancia del fenómeno de descarga en suelos

La mayoría de los suelos consisten en numerosas partículas con un grado de humedad en la cual pueden haber también una cierta cantidad de sales disueltas, el aire también hace parte de esa composición física el cual llena los espacios disponibles en el conjunto de partículas que forman la composición del suelo, es decir que el suelo está conformado principalmente por granos, agua y aire los cuales son los que regulan el proceso de inicio y desarrollo de la descarga eléctrica al interior del mismo. El agua cumple un papel fundamental en la conductividad eléctrica del suelo y de cuya cantidad depende la buena conducción o no del suelo como también la cantidad de sal disuelta en dicha agua. La cantidad de aire está determinada por los volúmenes de espacio disponible dejado por los granos y cantidad de agua contenida en la arena, el aire contenido en este material es parte importante de nuestro objeto de estudio en este trabajo de investigación y cuya explicación y modelo se explica en los capítulos siguientes.

Suelos con granos de gran tamaño (Grava) poseerán espacios de aire mayores comparados con aquellas suelos donde los granos son del orden de los milímetros, los espacios de aire contenidos son por esto también espacios no homogéneos, sin un tamaño predefinido y sin geometrías regulares. La configuración utilizada también determina el comportamiento de estos tres elementos (agua, granos, aire) dentro de una muestra de suelo, es el caso de la configuración de electrodos coaxiales utilizada en esta investigación.

El entendimiento del comportamiento de estos tres principales elementos contenidos en los suelos puede darnos un paso grande hacia la consecución de un modelo a través de estudios físicos aproximados.

## 2 MECANISMO TERMICO DE INICIO DE LA DESCARGA.

Para tratar de explicar el fenómeno de descargas en suelos, este estudio se ha centrado por largo tiempo en el estudio de dos etapas del proceso. El primero para dar explicación al inicio del proceso donde se deben tener en cuenta muchas variables presentes antes de generarse la descarga, estas variables hacen referencia a la resistividad, el contenido de agua, la temperatura, presión, configuración etc. Una segunda etapa relacionada con el crecimiento, propagación y finalización del fenómeno.

Algunos autores han realizado investigaciones teniendo en cuenta el efecto de la humedad en el inicio de la descarga eléctrica, planteando algunas hipótesis validadas o más tarde modificadas.

Una de las investigaciones [15] se centra en que el mecanismo que da inicio al proceso de las descargas al interior de los suelos es generado por el comportamiento térmico del suelo desde el punto de vista de la humedad contenida en el suelo, este planteamiento hace énfasis en canales formados de agua (Figura 3) que son calentados debido a la inyección de una onda impulso dentro de la muestra, generándose calor en las cadenas de agua en forma de $I^2R$, con un incremento cada vez mayor en la temperatura y por ende la conducción y lo que conlleva a una variación sensible en la resistividad de todo el conjunto llamado suelo.

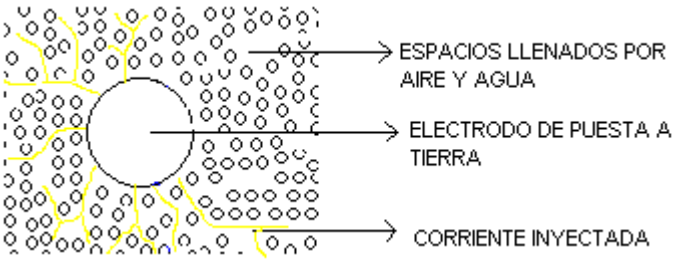



Figura 3: Canales formados de agua

Los canales conducen cada vez más corriente, lo que se traduce en mayor temperatura hasta el punto de alcanzar el punto de evaporización del agua contenida, luego de esto se produce un elevado crecimiento de la resistencia del espacio vaporizado, lo que conlleva

a una disrupción en esos espacios de aire que poseen mayor campo eléctrico dada la superación del gradiente critico de campo eléctrico $E_c$ del terreno.

Según este modelo, los tiempos de iniciación de los streamer o tiempos de inicio de la descarga eléctrica son el resultado de la conducción iónica a través de las rutas de agua que se forman en el suelo, este modelo realiza una serie de simplificaciones dentro de la que se encuentran el hecho de asumir rutas de agua normales al electrodo de puesta a tierra cuando este está enterrado en el suelo, dicha simplificación difiere en gran parte de la realidad, ya que allí se forma un conjunto de rutas complejas interconectadas. La ruta estudiada se considera como un filamento cilíndrico de agua con una conductividad que depende del contenido de sales disueltas en el agua considerada.

En este estudio existen dos opciones analizadas sin y considerando el efecto del medio circundante a los filamentos o rutas de agua. En el trabajo realizado en la Universidad Nacional por Roa Y Mendez [4] se presenta un análisis detallado de este modelo considerando y sin considerar el medio circundante.

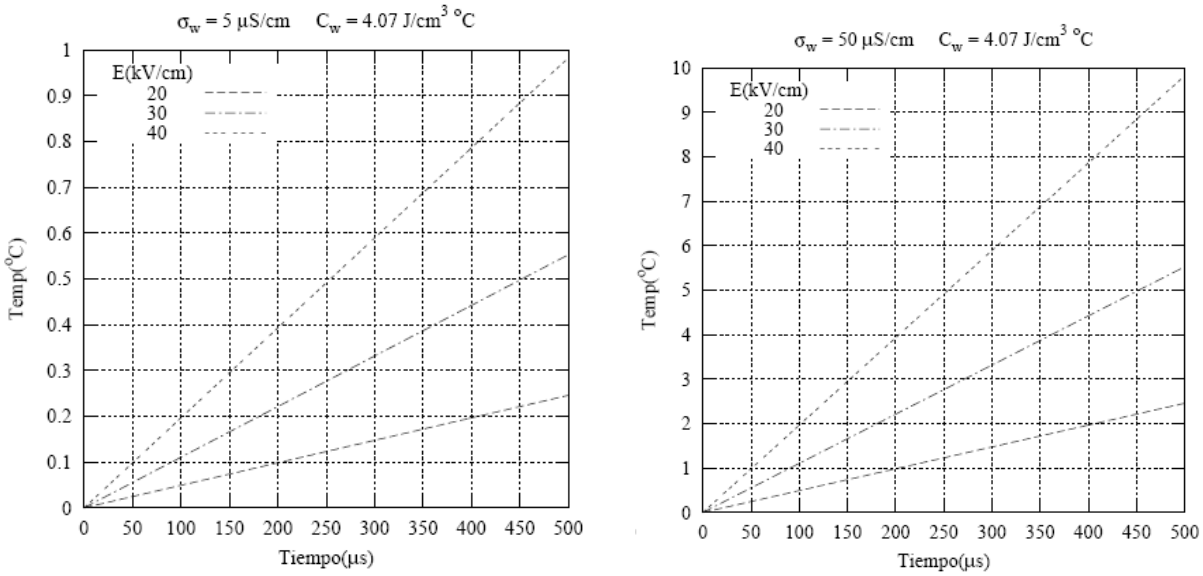
## 2.1 SIN CONSIDERAR EL MEDIO CIRCUNDANTE

Después de un trabajo matemático utilizando ecuaciones termodinámicas se llega al siguiente resultado:

$$\mathbf{T - T_0 = \frac{\sigma_w E^2}{C_w}(t - t_0)} \qquad 1.1$$

Siendo $T_0$ La temperatura inicial del cilindro de agua, $\sigma_w$ la conductividad del agua, E el campo eléctrico y $C_w$ es la capacidad calorífica del agua.

Graficando la ecuación (1.1) obtenemos los comportamientos mostrados en la figura 4 que permiten observar el comportamiento de la temperatura de los filamentos de agua en el tiempo.




a) Agua Destilada

b) Agua Salada

Figura 4: Temperatura del cilindro de agua sin considerar el medio circundante

De las gráficas se puede observar que al duplicar la intensidad de campo, la temperatura se cuadruplica en un mismo intervalo de tiempo, de igual forma hay una relación inversa entre el tiempo de calentamiento del agua y el campo eléctrico aplicado pero lo más importante que vale la pena destacar para este trabajo es cómo la conductividad del agua juega un papel importante en el proceso de calentamiento de un filamento de agua.

Como podemos observar para agua destilada, Figura 4a, tras la aplicación de un campo eléctrico de 20 kV/cm se produce un calentamiento del filamento de agua de apenas 0.20C en 300 µs, tiempos propios de los fenómenos transitorios de las descargas eléctricas atmosféricas. Sin embargo, usando agua con contenido de sal, Figura 4b, se puede para la misma intensidad de campo eléctrico de 20 kV/cm, llegar a la temperatura de vaporización de 100º C al cabo de solo 5 µs.

Este punto es muy importante para esta investigación ya que en los trabajos experimentales realizados por Pineda [8] y base para este trabajo, se realizaron experimentos con agua destilada para variar los contenidos de humedad del tipo de suelo utilizado, esto indica que al aplicar una onda de impulso tipo rayo no se produce una evaporización del agua contenida, también este hecho impide que el modelo descrito

anteriormente propuesto por Snowden no funcione para los casos en los cuales hay baja conductividad del agua

## 2.2 CONSIDERANDO EL MEDIO CIRCUNDANTE

De la misma forma como en el caso anterior, se hace un análisis matemático del comportamiento de la temperatura del filamento de agua considerando esta vez el suelo circundante, por lo que se asume el filamento de agua como un conductor térmico perfecto, Caeslaw y Jaeger [16] asi como Roa y Mendez [4] plantean y resuelven el problema de flujo de calor para este caso, obteniendo el siguiente resultado:

$$\mathbf{T} = \frac{\mathbf{2Q\zeta^2}}{\boldsymbol{\pi}^3\mathbf{K}} \int_0^\infty \frac{\mathbf{1-e^{\alpha t \mu^2/a^2}}}{\boldsymbol{\mu}^3 \Delta(\boldsymbol{\mu})} \mathbf{d\mu} \qquad 2.2$$

Donde:

$Q$: Calor suministrado al filamento por unidad de longitud y por unidad de tiempo.

$a$: Radio del filamento de agua que se calienta.

$K$: Conductividad térmica de medio circundante al filamento.

$\zeta = C_s/C_w$ Relación de la capacidad de calor volumétrica del medio circundante y la capacidad calorífica del filamento de agua.

$\alpha = k/C_s$ Difusividad térmica del suelo

$\mu$: Variable proporcional a la transformada de Laplace

$t$: Tiempo

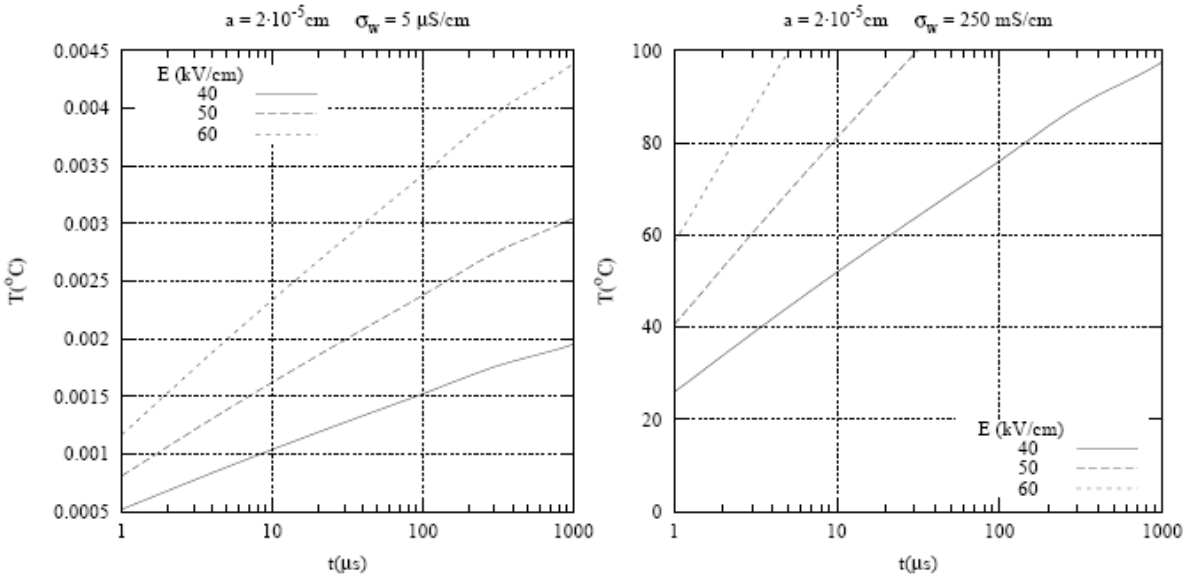
El denominador de la integral es:

$$\Delta(\mu) = [\mu J_0(\mu) - 2\zeta J_1(\mu)]^2 + [\mu Y_0(\mu) - 2\zeta Y_1(\mu)]^2 \qquad 2.3$$

$J_0, J_1, Y_0, Y_1$ son las funciones cero y primera de Bessel respectivamente de primera y segunda clase. La explicación detallada de la ecuación anterior y la consecución de la

misma no es relevante para esta investigación y puede encontrarse un análisis detallado en la referencia [4]

A partir de la anterior ecuación se obtienen las siguientes gráficas (Figura 5) que representan el cambio en la temperatura del agua contenida en el suelo con respecto al tiempo.




a) Agua Destilada b) Agua Salada

Figura 5: Variación de la temperatura del cilindro de agua considerando el medio circundante

Como se observa no son muy fuertes la diferencias considerando el medio circundante o sin el, el cambio radica en la forma de crecimiento de la temperatura en función del tiempo.

Como se mostró en las anteriores gráficas la conductividad del agua es un factor determinante en el comportamiento del calentamiento del filamento considerado, lo que resulta fácil ver, es que el tipo de agua utilizada cambia por completo la funcionalidad de este modelo planteado, ya que para agua destilada o con baja conductividad no es posible analizar este fenómeno asumiendo que el agua contenida en el suelo se evapora cuando este es sometido a una descarga atmosférica. Este hecho abre la posibilidad de estudiar este fenómeno en otro sentido ya que de acuerdo a los experimentos realizados por Pedro Pineda en la Universidad Nacional en los cuales utiliza agua destilada no

debería haberse presentado disrupción de acuerdo al anterior planteamiento, sin embargo sucedió todo lo contrario, a pesar que se tenía agua con baja conductividad se registraron disrupciones en todos los casos experimentados.

# 3 MODELOS ELÉCTRICOS DESAROLLADOS ACERCA DEL FENÓMENO ESTUDIADO

Ante la dificultad de aplicación del anterior modelo en situaciones prácticas la ingeniería eléctrica ha continuado desarrollando modelos para explicar los comportamientos observados en la práctica en suelos usados para puestas a tierra. El más difundido ha sido el de Liew y Darveniza [1] construido para la configuración de un electrodo enterrado y el cual como se verá presenta inconvenientes a la hora de ser aplicado en una configuración coaxial.

## 3.1 MODELO LIEW AND DARVENIZA (MODELO ELÉCTRICO)

En los años 70 Liew y Darveniza [1] desarrollaron un modelo dinámico para describir el comportamiento del suelo ante la aplicación descargas eléctricas, con el fin de validar su modelo Liew y Darveniza realizaron una serie de experimentos en diferentes tipo de suelo, este modelo funciona para resistividades de suelos entre 5000 y 31000 ohms-metro

El modelo de Liew y Darveniza [1] es el modelo más utilizado actualmente por brindar una explicación que describe muy de cerca los resultados experimentales realizados de este fenómeno, este modelo se basa en la superación de la rigidez dieléctrica de los espacios de aire contenidos en el suelo. El modelo se basa en suelos con resistividades entre 5000ohms-metro y 31000ohms-metro para casos como el de un electrodo concentrado de puesta a tierra, para desarrollar este modelo se realizan una serie de simplificaciones que facilitan el modelamiento del complejo comportamiento que presenta el suelo en este tipo de fenómeno, dichas suposiciones son:

a. Se considera el suelo como un medio homogéneo e isotrópico, razón por la cual la resistencia se toma igual en todas las direcciones.

b. Tan pronto la corriente aumenta y penetra en el suelo, aquellas regiones que tienen una densidad de corriente J mayor que una densidad crítica Jc, tendrán una resistividad menor que la resistividad de baja corriente ρ0. Esto corresponde al estado de disrupción, el cual ocurre por una consolidación de un canal que cambia de resistividad en función del tiempo transcurrido. De tal forma que la

resistividad del suelo tiene una transición en la cual ésta cae de su más alto valor ρ0 (valor en condición de no descarga) hasta valores menores (condición de descarga) los cuales decaen exponencialmente con el tiempo como:

$$\rho = \rho_0 e^{\frac{-t}{\tau_1}} \qquad 3.1$$

Donde $\tau_1$ es llamada constante de ionización y t es el tiempo medido desde que se da inicio al proceso de descarga

c. Tan pronto como la corriente empieza a disminuir, la resistividad recobra el valor inicial $\rho_0$en forma exponencial dependiente del tiempo y de la densidad de corriente de la siguiente manera:

$$\rho = \rho_0 \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_2}}\right) \qquad 3.2$$

Donde $\tau_2$ es la constante de deionización y t es el tiempo medido desde que se da inicio al proceso de deionización o de recuperación

d. Existe una consideración de energía que debe incluir el hecho de que entre mayor sea la cola de un impulso tipo rayo, o mayor sea la energía inyectada al suelo, la resistividad permanecerá en su menor valor mayor tiempo, mediante la relación expresada por el factor

$$\left(1 - \frac{J}{J_C}\right)^2 \qquad 3.3$$

.

La siguiente figura muestra el perfil de la resistividad en función del crecimiento y decrecimiento de la corriente:

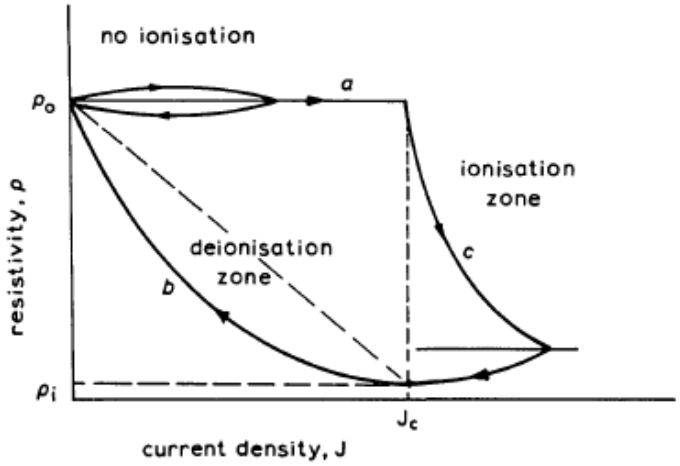



Figura 6: Perfil de resistividad.
Fuente [1]

### 3.1.1 Modelo aplicado para determinar el comportamiento de la resistencia de un electrodo concentrado de puesta a tierra

Si se tiene un electrodo sobre el cual no se tienen caídas de voltaje a lo largo de su longitud, puede tratarse a este electrodo como *concentrado*, de tal forma que se puede estudiar al sistema a través de un circuito de parámetros concentrados y encontrarse la impedancia de puesta a tierra. Inicialmente puede ser de interés centrarse en el cálculo de la resistencia de puesta a tierra R que presenta el suelo ante la inyección de impulsos tipo rayo; para ello es necesario tomar las consideraciones mencionadas por Liew y Darveniza en el modelo dinámico propuesto. Debido a que se tienen estados de no descarga y de descarga eléctrica, es necesario evaluar la resistencia al impulso en determinados instantes con base en la variación que tenga la resistividad del medio.

#### 3.1.1.1 Resistencia de no descarga

Durante el proceso se involucran en el modelo diferentes estados con diferentes resistividades que deben ser determinados siguiendo el siguiente procedimiento.

La resistencia total de la configuración considerando un estado de no disrupción se calcula teniendo en cuenta la geometría de la configuración, que para este caso se

consideran superficies equipotenciales dadas por una superficie cilíndrica y una semiesfera con espesor dr como se muestra en la figura 7 alrededor del electrodo, de esta forma la resistencia total en este caso estará dada por la siguiente integral:

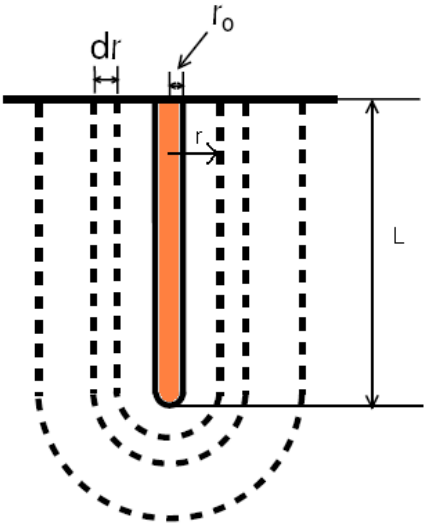



Figura 7: Superficies equipotenciales

$$R = \int_{r_0}^{\infty} \frac{\rho dr}{2\pi(r^2+rl)} \qquad 3.4$$

Resolviendo [3.4] se obtiene la resistencia total en la condición de no descarga.

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} ln\left(\frac{r_0+l}{r_0}\right) \qquad 3.5$$

Donde $r_0$es el radio del electrodo y $l$ la longitud

#### 3.1.1.2 Resistencia de descarga

Después que se supera la rigidez dieléctrica ocurre el fenómeno de descarga, la corriente aumenta y la resistencia del terreno comienza a disminuir, la resistencia es ahora calculada siguiendo las suposiciones realizadas para el modelo.

Cuando una alta corriente es inyectada dentro del suelo se produce el fenómeno de disrupción y se consideran las siguientes relaciones:

$$J = \frac{I}{2\pi r^2} \qquad 3.6$$

$$J_c = \frac{g_c}{\rho_0} \qquad 3.7$$

Donde $J$ es la densidad de corriente, $J_c$ la densidad de corriente critica, $\rho_0$ la resistividad del suelo y $g_c$ es el gradiente critico de voltaje.

Para evaluar la resistencia instantánea, cada elemento de volumen debe ser considerado como se muestra a continuación:

a. La resistividad permanece constante en $\rho_0$ hasta que la densidad de corriente del elemento excede el valor critico.

$$\rho = \rho_0 \;\; para\, J < J_c \qquad 3.8$$

b. Cuando la densidad de corriente supera el valor critico, la resistividad decae en forma exponencial correspondiente a la ionización del suelo donde $\tau_1$ es llamada constante de ionización y $t$ es el tiempo medido desde que se da inicio al proceso de descarga asi:

$$\rho = \rho_0 e^{\frac{-t}{\tau_1}} \;\; para\, J \geq J_c \qquad 3.9$$

La ionización del suelo avanzará hasta el radio $r_{cm}$ (Ver figura 8) correspondiente al valor pico de la corriente inyectada.

Cuando la corriente empieza a decaer desde su valor máximo se consideran tres regiones como se muestra en la figura 8

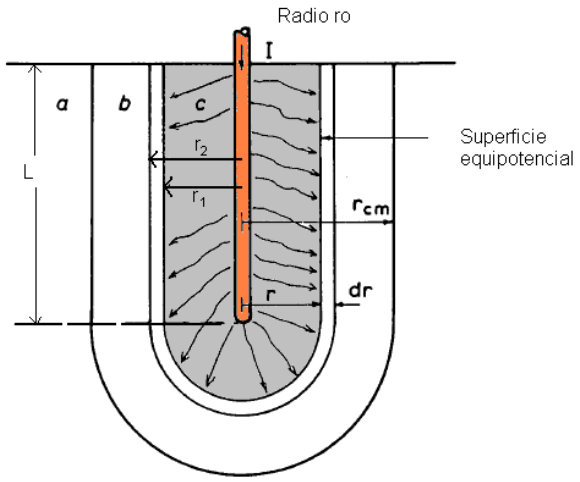



Figura 8: Regiones según modelo Liew y darveniza

**REGION A:** Donde $r > r_{cm}$ y $J < J_c$ . Esta región corresponde a la parte del suelo que no ha sido ionizada, por consiguiente:

$$\rho = \rho_0 \qquad 3.10$$

**REGION B**: Donde $r < r_{cm}$ y $J < J_c$. La densidad de corriente J esta ahora por debajo del valor crítico y la resistividad del suelo se recupera de acuerdo a la siguiente relación:

$$\rho = \rho_i + (\rho - \rho_i)\left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_2}}\right)\left(1 - \frac{J}{J_c}\right)^2 \qquad 3.11$$

Donde $\tau_2$ es la constante de tiempo de deionización, $\rho_i$ es el valor de la resistividad que tiene la región del suelo en el momento de inicio de la recuperación, es decir la resistividad que alcanzó la región del suelo en la etapa de decrecimiento donde $J$ es igual a $J_C$ . Y $t$ es el tiempo medido desde el inicio de la recuperación.

**REGION C:** Donde $r < r_{cm}$ y $J \geq J_c$. La densidad de corriente *J* aún excede el valor crítico, y la ionización continua hasta el punto $J = J_c$, Luego, esta región hará parte de la región B.

$$\rho = \rho_0\left(e^{\frac{-t}{\tau_1}}\right)$$

Como puede verse, cada elemento de volumen tiene una diferente densidad de corriente para un determinado valor de corriente en el tiempo por lo tanto cada elemento tendrá una diferente resistividad. La resistencia total en cualquier tiempo es obtenida sumando las resistencias elementales en sus diversos estadios de ionización. Este cálculo puede realizarse de una forma fácil utilizando una herramienta computacional. En la referencia [4] se desarrolla un programa computacional para este modelo.

Este modelo recae en el hecho que el comportamiento de la impedancia de puesta a tierra ante descargas tipo rayo se ajusta a ecuaciones exponenciales con parámetros que deben ser determinados, estos parámetros son $g_c, \tau_1$ y $t_2$ , para esto Liew y Darveniza presentan una tabla con los valores que deben ser escogidos de acuerdo al suelo utilizado en la prueba.

| Source | Liew and Darveniza | |
|---|---|---|
| Electrode | Single driven rod | |
| Ground type | Soil A | Soil B |
| Oscillogram number | | |
| Soil parameters: | | |
| $\rho_0$, resistivity, $\Omega$ cm | 5050 | 5000 |
| $g_C$, BD gradient, kV cm$^{-1}$ | 3·0 | 1·1 |
| $\tau_1$, ionisation } time constant, $\mu$s | 2·0 | 2·0 |
| $\tau_2$, deionisation } time constant, $\mu$s | 4·5 | 4·5 |

Figura 9: Parámetros utilizados en el modelo dinámico Liew-Darveniza
Fuente [1]

## 3.2 MODELO ELÉCTRICO LIEW-DARVENIZA APLICADO A UNA CONFIGURACIÓN DE UN ARREGLO CILÍNDRICO COAXIAL.

Con base en los resultados experimentales obtenidos por Pedro Pineda [8], los Ingenieros Roa-Mendez [4] adoptaron el modelo realizado por Liew y lo aplicaron al arreglo coaxial simulado por Pineda. El objetivo era analizar el desempeño del modelo eléctrico al intentar explicar el comportamiento de los resultados experimentales obtenidos por Pineda. Haciendo un análisis similar al anterior e ingresando los parámetros a un programa realizado en computador se obtuvo el resultado mostrado en la figura 10.

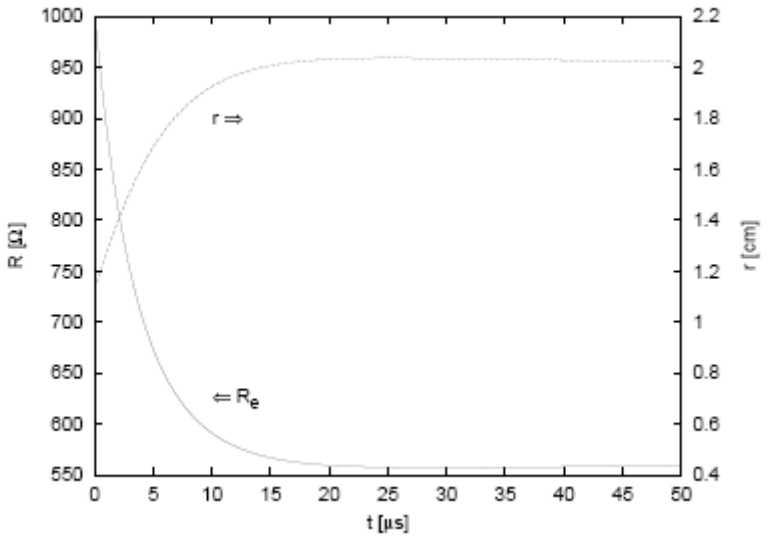



Figura 10: Resistencia del objeto de prueba y radio alcanzado por la descarga.

Fuente [4]

Los autores concluyeron que si bien, el modelo Liew y Darveniza funciona eficientemente en una configuración determinada, presenta problemas a la hora de explicar el comportamiento obtenido por Pineda en su trabajo experimental, en la grafica se observa que la resistencia no presenta un estado de recuperación.

## 3.3 MODELO PINEDA

Dando continuidad al interés de obtener un modelo teórico que explique el comportamiento experimental del suelo ante la aplicación de descargas en diferentes configuraciones, Pedro Pineda en su tesis de maestría [8] desarrolla un modelo teórico basado en el modelo eléctrico obtenido por Liew-Darveniza pero aplicado a la configuración de un arreglo cilíndrico coaxial.

A continuación se explica de manera breve el trabajo realizado por Pedro Pineda en su tesis de maestría

### 3.3.1 Configuración utilizada parte experimental

Se utiliza una configuración de dos cilindros coaxiales como se muestra en la figura 11.

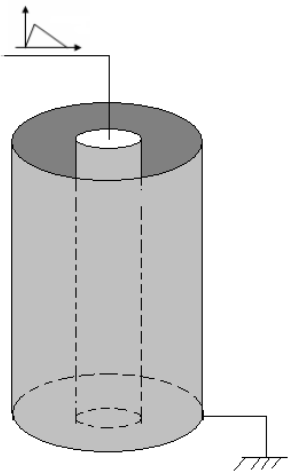


Figura 11: Configuración analizada en el laboratorio
Fuente [8]

Dimensiones:

Longitud: 70cm

Radio del electrodo interno: 0.48cm

Radio del electrodo externo: 12.7cm

En las pruebas de laboratorio se utilizó la probeta mostrada anteriormente, arena tratada especialmente y con condiciones óptimas para medición y generación de impulso. El Ingeniero Pedro Pineda obtuvo así diferentes curvas V/I para contenidos diferentes de humedad

Para una humedad del 3% se presentó un comportamiento dinámico para la curva V/I que contiene tres estados característicos y cuyo comportamiento depende de las condiciones de humedad.

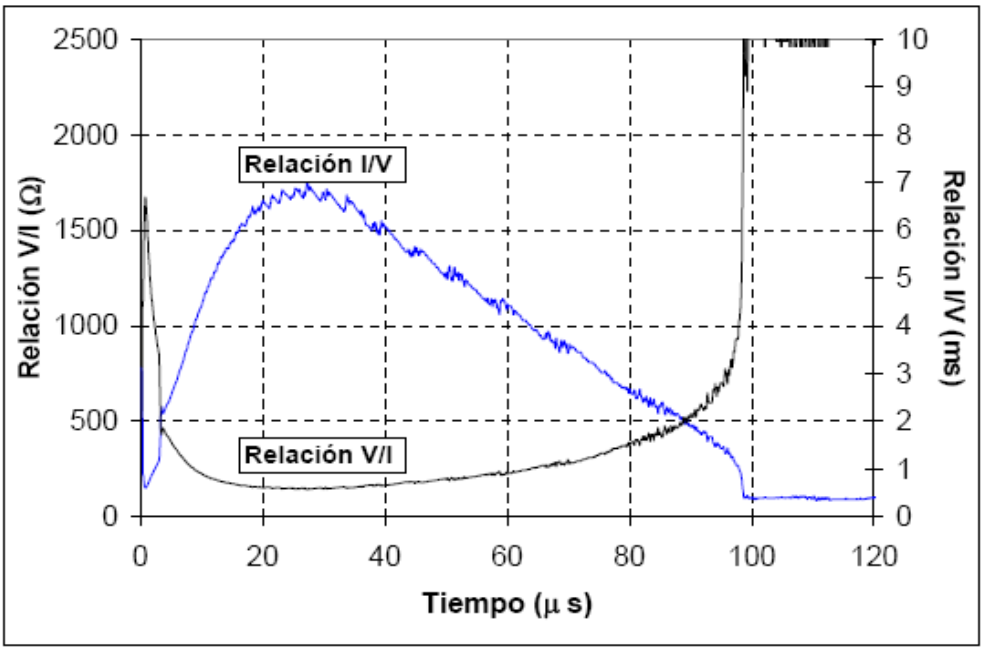



Figura 12: Relacion V/I, I/V encontrada en el laboratorio, nivel de humedad 3%

Fuente [8]

### 3.3.2 Modelo eléctrico aproximado de las pruebas de laboratorio considerando la expansión del electrodo interno.

El primer modelo se basa en suponer que el electrodo interno de la configuración usada se expande durante el proceso de la descarga, es decir que el radio del electrodo interno se va haciendo cada vez más grande hasta que finalmente alcanza el radio del electrodo externo.

DESCRIPCION MATEMÁTICA.

Se halla la impedancia que presenta la configuración teniendo en cuenta el valor de R,L y C así.

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln\left(\frac{\mathrm{b}}{\mathrm{a}}\right) [\Omega] \qquad 3.12$$

$$L = \frac{\mu}{2\pi l} \ln\left(\frac{b}{a}\right) [H] \qquad 3.13$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} [F] \qquad 3.14$$

Entonces

$$Z = \frac{1}{2\pi l} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \left\{\frac{\rho}{1+(\omega\epsilon\rho)^2} + j\omega\left[\mu L^2 - \frac{\rho^2\epsilon}{1+(\omega\epsilon\rho)^2}\right]\right\} \qquad 3.15$$

La anterior ecuación se expresa de la siguiente manera, teniendo en cuenta que una parte de la ecuación es una variable constante que depende de las dimensiones de la probeta utilizada.

$$Z = K \ln\left(\frac{b}{a}\right) \qquad 3.16$$

Teniendo en cuenta que se supone el radio del electrodo interno aumentando durante el proceso de de descarga tenemos entonces:

$$Z = K \ln\left(\frac{b}{a'}\right) \qquad 3.17$$

Utilizando un valor para K a una frecuencia determinada y observando que la curva experimental puede obedecer a dos exponenciales se puede hallar una expresión analítica para la curva V/I.

El modelo se basa en la consecución de dos tiempos que se hallan determinando las velocidades de ensanchamiento y adelgazamiento del ancho del electrodo interior (Figura 13) así:

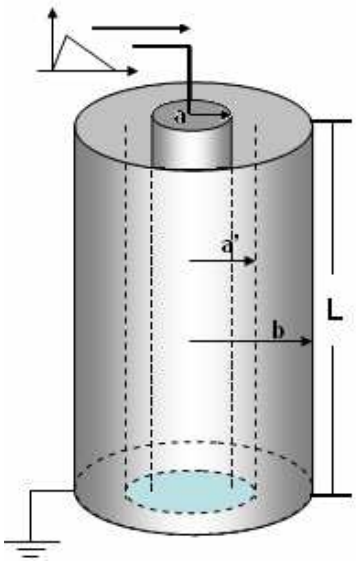



Figura 13: Configuración modelo Pedro Pineda

$$V_1 = \frac{b-a}{t_1} \qquad V_2 = \frac{b-a}{t_2} \qquad 3.18$$

Los tiempos $t_1$ y $t_2$ se determinan de la curva obtenida experimentalmente, para este caso a una humedad del 3%.

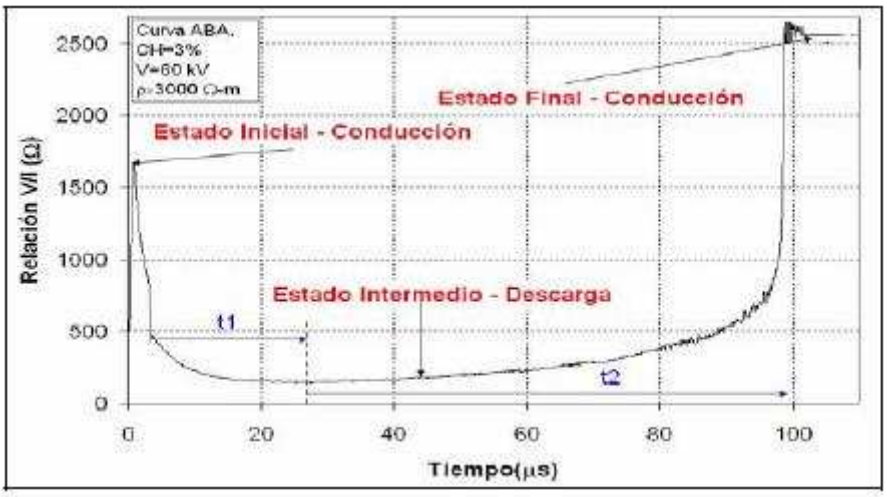



Figura 14: Curva experimental
Fuente [8]

Entonces:

$$t_1 = 27\mu s \quad t_2 = 75\mu s \quad b - a = 12.2cm$$

Se calcula y se obtiene.

$V_1 = 4.53cm/\mu s$

$V_2 = 1.69cm/\mu s$

Ahora considerando las velocidades constantes durante el proceso se puede encontrar para cada posición a' ya sea en sentido de avance o retroceso, por lo tanto para cada posición de a' se encuentra un tiempo determinado.

$$t_1' = \frac{a'-a}{V_1} \quad t_2' = \frac{b-(a'-a)}{V_2} + t_1 \qquad 3.19$$

Con esto se obtiene finalmente una curva dinámica para la impedancia de la configuración utilizando este modelo (Figura 15).

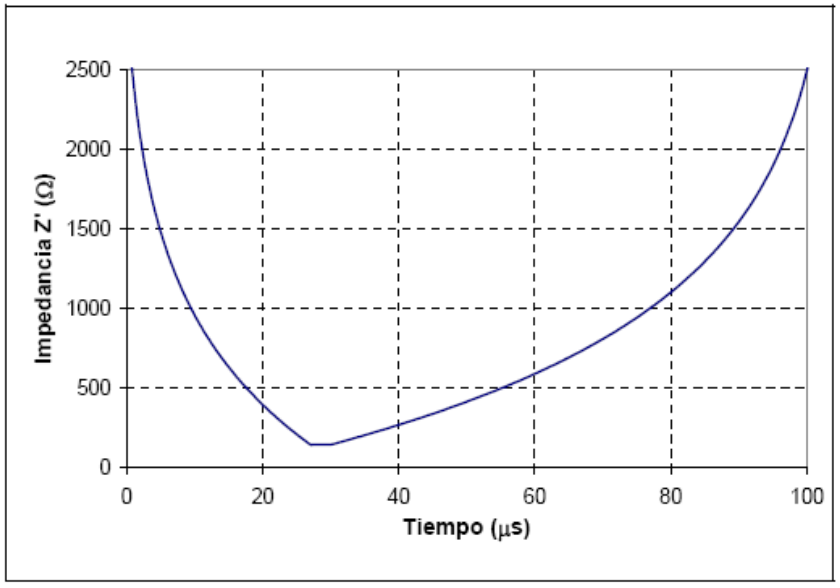



Figura 15: Modelo eléctrico exponencial de constantes de tiempo.

### 3.3.3 Modelo 2: Modelo exponencial

El segundo modelo analítico se basa en el hecho que los fenómenos crecientes y decrecientes vistos en la curva experimental se basan en procesos físicos de carácter exponencial, se propone que la forma decreciente de la relación V/I de los eventos disruptivos en todas las pruebas de laboratorio, se comporta físicamente de manera exponencial y de la forma:

$$\text{Decreciente} \quad \frac{V}{I} = Z_D(t) = Z_0 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + Z_{min} \qquad 3.20$$

$$\text{Creciente} \quad \frac{V}{I} = Z_C(t) = (Z_0 - Z_{MIN})\left(1 - e^{\frac{(t-t_1)}{\tau_2}}\right)\left(\frac{K}{I}\right) + Z_{min} \qquad 3.21$$

La exponencial contiene dos constantes de tiempo llamadas $\tau_1$ y $\tau_2$ las cuales se deben encontrar para cada condición de humedad y de tensión disruptiva aplicada, $Z_0$ corresponde al valor inicial en la condición de no descarga, $Z_{min}$ es el valor mínimo de la relación V/I que corresponde al estado final del fenómeno decreciente $t_1$ es el tiempo de inicio del proceso de crecimiento o recuperación de la descarga el cual es igual al tiempo final de decrecimiento del fenómeno 1. K es un factor de ajuste a la forma de onda que se debe encontrar para cada condición de humedad e I es el pulso de corriente inyectado.

A continuación se observa la comparación entre los modelos descritos anteriormente y los resultados experimentales

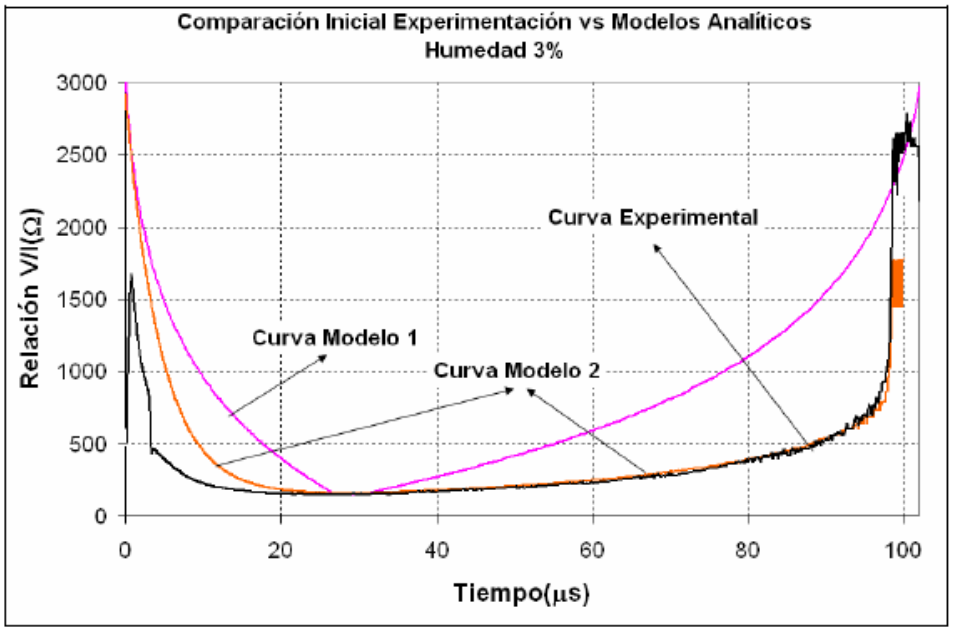



Figura 16: Comparación modelos

Fuente [8]

Como se puede observar el MODELO 2, puede ajustarse para representar de forma bastante satisfactoria el comportamiento de la curva V/I en condición de disrupción.

La inquietud que se genera con respecto al modelo es el significado físico de $\tau_1$ y $\tau_2$ y de los fenómenos que representan, pues al igual que el modelo de Liew y Darveniza, carece de sentido físico y se limita a ajustar las curvas a formas exponenciales. También y como se mencionó anteriormente, el modelo de Liew y Darveniza no funciona adecuadamente para la configuración de cilindros coaxiales.

Dicho de esta forma y teniendo en cuenta que los modelos explicados anteriormente no son convincentes, a continuación se estudia de una forma detallada un modelo propuesto años atrás y que tiene en cuenta el efecto térmico para explicar los fenómenos de disrupción en suelos.

# 4 SIMULACIÓN MODELO VERNON COORAY PARA UN ELECTRODO CONCENTRADO DE PUESTA A TIERRA

Uno de los modelos más recientes aplicado al comportamiento del suelo ante impulsos tipo rayo es el planteado por V. Coorey [3] y publicado en un "Journal Electrostatics" en 2004 que tiene en cuenta el comportamiento físico térmico del suelo en este tipo de fenómeno. Como parte fundamental del trabajo realizado en esta investigación se estudió detalladamente este modelo y se diseñó en MATLAB el código necesario para obtener los resultados numéricos de él.

A continuación se describe el modelo y se incluye además el resultado de la simulación obtenida gracias al código implementado, donde se pueden ver sus resultados.

Este modelo toma en cuenta la creación de canales de descarga alrededor del electrodo enterrado, la resistencia de estos canales como función del flujo de corriente a través de ellos, la conductividad del aire como función de la temperatura y la generación y disipación de calor en dichos canales.

En la construcción de este modelo se asumen las siguientes condiciones:

a. Se asume que las superficies equipotenciales alrededor del electrodo interno pueden ser representadas por secciones cilíndricas, con una capa semiesférica. Esto es ilustrado en la Figura [17]. Liew and Darveniza [1] mostraron que la resistencia de un conductor enterrado podría ser obtenida con una razonable aproximación adoptando esta simplificación. Se asume que esta simetría es conservada incluso durante la ionización del aire en el suelo.

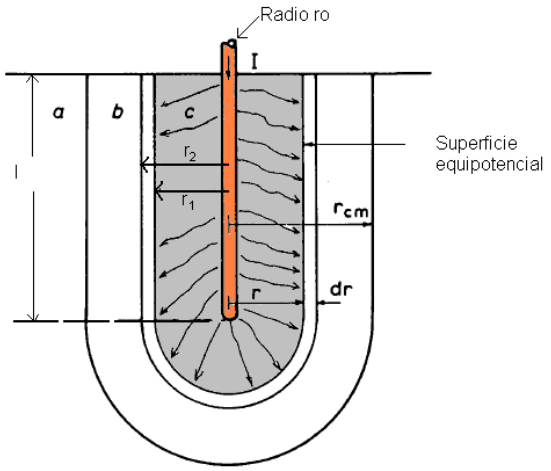



Figura 17: Superficies equipotenciales alrededor de la varilla enterrada.

b. Se asume que el proceso de ionización comienza en un volumen elemental dado cuando el campo eléctrico en ese elemento se incrementa más allá de un cierto valor crítico.

c. El mecanismo exacto con el cual la disrupción eléctrica en el suelo inicia no es conocido, es posible que tal proceso de disrupción en el suelo consista en una serie de descargas eléctricas que toman lugar en los huecos de aire que se encuentran entre los granos de suelo. Estudios de descargas eléctricas en el aire a escala milimétrica [17] muestran que el proceso de disrupción puede ser dividido en dos partes. Una primera fase consiste en la propagación de los streamer a través de las cavidades de aire, lo cual crea una zona de canales donde la carga se distribuye en los filamentos, creando así una zona luminosa donde el calentamiento podría ser de unos pocos miles de grados centígrados lo que expande cada vez más el filamento del streamer. En la segunda fase la corriente y la temperatura en el canal comienzan a incrementarse, la ionización térmica comienza a ser significante. Datos experimentales muestran que en pequeños espacios se aire, la duración de la primera fase es de unos pocos cientos de nanosegundos [17]. En el modelo usado por Cooray se asume que la primera fase toma lugar instantáneamente dejando atrás un canal de descarga, el cual es llevado a la temperatura $T_0$ con una conductividad elevada. Desde este punto en adelante el desarrollo temporal de la temperatura y la conductividad de

los canales son estimados asumiendo que la energía disipada en los canales es usada completamente para calentar los canales. La variación de la conductividad de los canales de descarga como una función del tiempo es obtenida de los datos experimentales sobre conductividad del aire en función de la temperatura [9]

d. El volumen de aire calentado es asumido como una fracción F del volumen total de arena en la cual la ionización toma lugar. El flujo de corriente a través de este volumen de aire disipará más energía incrementado cada vez más la temperatura y por ende la conductividad. También se asume que la disipación de calor desde el volumen caliente hacia el suelo circundante es proporcional al volumen y temperatura del aire caliente. S denota la constante de proporcionalidad. En el modelo $\mathrm{T}_0, \mathrm{F}$ y $\mathrm{S}$ son los parámetros que tienen que ser determinados por comparación con los datos experimentales.

DESCRIPCION MATEMATICA.

Se considera un elemento de volumen de espesor $dr$ localizado a una distancia $r$ del conductor enterrado. La densidad de la corriente pasando a través de este elemento está dada por:

$$J(t) = \frac{I(t)}{2\pi r l + 2\pi r^2} \qquad 4.1$$

Donde $I(t)$ es la corriente inyectada dentro de la varilla y $l$ es la longitud de la varilla. Se asume que la ionización del aire en este elemento iniciará cuando la densidad de corriente que pasa a través del elemento supere un valor crítico. Se denota el valor crítico por:

$$J_0 = \sigma E_b \qquad 4.2$$

Donde $E_b$ es el campo eléctrico de disrupción en el suelo. Para un valor pico dado de la corriente inyectada, $I_p$, el radio crítico, $R_c$, donde mas allá no toma lugar la ionización del suelo puede ser obtenido resolviendo la siguiente ecuación.

$$J_0 = \frac{I_p}{2\pi R_c l + 2\pi R_c^2} \qquad 4.3$$

La resistencia de los elementos de volumen localizados más allá de este radio crítico están dados por:

$$dR_s = \frac{dr}{\sigma_s(2\pi r l + 2\pi r^2)} \qquad 4.4$$

Donde $r \leq R_c$

Donde $\sigma_s$ es la conductividad del suelo. La ionización del aire de cualquier elemento de volumen localizado antes del radio crítico es iniciada en el tiempo $t_0$ en el cual la densidad de corriente del elemento supera el valor crítico $J_0$. Para valores de $t \leq t_0$ la resistencia del elemento de volumen esta dado por:

$$dR(t < t_0) = \frac{dr}{\sigma_s(2\pi r l + 2\pi r^2)} \qquad 4.5$$

Donde $r \leq R_c$

Acorde con las suposiciones realizadas concernientes a la fase de pre descarga de la ionización, en el tiempo $t = t_0$ un volumen de aire de magnitud igual a $F[2\pi r l dr + 2\pi r^2 dr]$ en este elemento de volumen es inmediatamente llevado a la temperatura $T_0$, por consiguiente la resistencia, del elemento de volumen en $t = t_0$ cambiará de la ecuación anterior a la ecuación:

$$dR(t = t_0) = \frac{dr}{(\sigma_s + F\{T_0/T_a\}\sigma_a(T_0)(2\pi r l + 2\pi r^2)} \qquad 4.6$$

Donde $\sigma_a$ es la conductividad del aire, el cual es una función de la temperatura $T_0$, y $T_a$ es la temperatura del volumen de aire antes que ocurra la ionización. La variación de la conductividad del aire como función de la temperatura es insertada en el modelo ajustándose a la construcción polinomial disponible en [9].

Se debe anotar que la fracción F es mucho más pequeña que la unidad y es factor de la relación $\{T_0/T_a\}$, el aire calentado está a presión atmosférica.

**Ahora se considera qué pasa en el intervalo $t = t_0$ a $t = t_0 + dt$.**

El flujo de corriente a través del volumen de aire caliente disipará más energía conduciendo a un nuevo aumento de la temperatura y por ende a la conductividad del aire. La energía disipada en el volumen de aire durante este intervalo de tiempo está dada por:

$$dE = P * dt \qquad 4.7$$

$$P = \{I(t)\}^2 * dR \qquad 4.8$$

De 4.6 sabemos que

$$dR = \frac{dr}{(\sigma_s + F\{T0/Ta\}\sigma_a(T_0))(2\pi rl + 2\pi r^2)} \qquad 4.9$$

Entonces finalmente la energía disipada en Julios será (Reemplazando 4.9 y 4.8 en 4.7):

$$dE = \frac{\{I(\mathrm{t})\}^2 drdt}{(\sigma_s + F\{T0/Ta\}\sigma_a(T_0))(2\pi rl)} \qquad 4.10$$

En este modelo se asume que la disipación de calor desde dicho volumen hacia el suelo circundante es proporcional al volumen y la temperatura del aire caliente así:

$$dH = SF\{T_0/T_a\}(2\pi rl + 2\pi r^2)\, dr\, T_0 \qquad 4.11$$

Donde S denota la constante de proporcionalidad.

Es importante anotar que esta ecuación (4.11) difiere de la presentada en el paper realizado por Vernon Cooray en [3] ya que en esta publicación la ecuación anterior se encuentra multiplicada por un factor $\mathrm{dt}$, situación que parece errónea. Esto se puede comprobar interpretando el sentido del modelo y además realizando una eliminación de unidades en la cual de tener en cuenta el tiempo, las unidades obtenidas para el calor no corresponden a las unidades correctas.

En el modelo $T_0,\ F\ y\ S$ son parámetros que tienen que ser determinados por comparación de las simulaciones con los datos experimentales.

Así entonces el incremento en la temperatura del volumen de aire durante el intervalo de tiempo $dt$ es entonces:

$$dQ = m \times c \times dT \qquad 4.12$$

$$dT = \frac{dQ}{m.c_p} = \frac{dE - dH}{m.c_p} \qquad 4.13$$

Sabiendo que:

$$m = \rho\, V \rightarrow m = \rho\, F\{T_0/T_a\}(2\pi r l + 2\pi r^2)\, dr \qquad 4.14$$

Entonces:

$$dT = \frac{dE - dH}{m.c} = \frac{dE - dH}{F\{T_0/T_a\}(2\pi r l + 2\pi r^2)\, dr\, \rho\, c_p} \qquad 4.15$$

Donde $\rho\ y\ \ c_p$ son la densidad y el calor especifico del aire respectivamente. Este procedimiento puede ser repetido para evaluar la variación de la temperatura del volumen de gas bajo consideración como una función del tiempo y a partir de este, la variación en el tiempo de la resistencia del volumen de aire puede ser obtenida. El mismo procedimiento es aplicado en cada elemento desde $r = r_0$ (Donde $r_0$ es el radio el conductor) hasta $r = \infty$. La resistencia total del suelo en la configuración de un electrodo concentrado de puesta a tierra puede ser obtenida así:

$$R(t) = \int_{r_0}^{R_c} dR(t)dr + \int_{R_c}^{\infty} dR_s dr \qquad 4.16$$

## 4.1 SIMULACION

Luego de entender la descripción matemática se realiza un algoritmo de computo utilizando MATLAB (Anexo 1), para simular el resultado de este modelo y validarlo por medio de comparación con los resultados presentados por Vernon Coorey en [3]

Se considera entonces una varilla de longitud 3.05m con un radio de 0.0127m el cual está enterrado en un suelo con conductividad 11.5mS/m. El pulso de corriente inyectado dentro del conductor es mostrado en figura 18. El mejor ajuste se obtiene con 3800K, 0.01 y 10.2 $JK^{-1}\ m^{-1}$ para $T_0$, F, y S respectivamente. La figura 19 muestra el resultado que arroja el programa después de simular el modelo, este resultado corresponde al obtenido y presentado por Vernon Cooray en la “figura 4” de su paper [3].

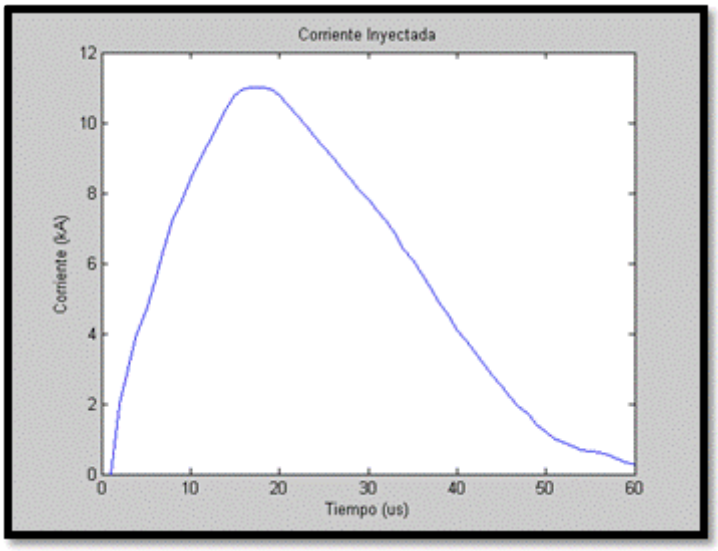



Figura 18: Corriente Inyectada

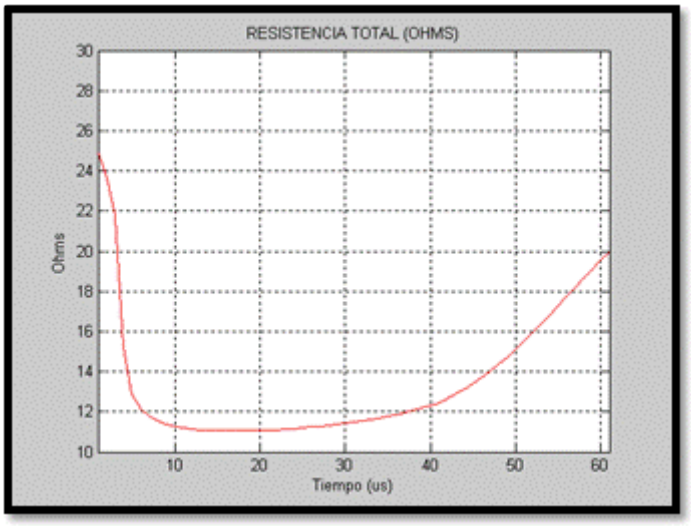



Figura 19: Resultado obtenido Modelo

# 5 PROPUESTA DE MODELO TERMOELECTRICO PARA LA DESCARGA EN ARENA BAJO IMPULSOS TIPO RAYO EN LA CONFIGURACIÓN DE DOS ELECTRODOS CILINDRICOS COAXIALES.

Como se mencionó en los capítulos anteriores, los modelos encontrados hasta el momento, incluyendo el realizado por Liew y Darveniza el más reconocido internacionalmente, carecen de explicaciones físicas satisfactorias del comportamiento del fenómeno estudiado. El modelo de Liew y Darveniza por ejemplo, plantea ecuaciones exponenciales que explican el comportamiento dinámico de la resistencia del suelo ante impulsos de corriente que reproducen satisfactoriamente los resultados experimentales pero que carecen de un sentido físico apropiado. Además, y como lo demostró Roa [4] en su tesis, este modelo no explica los resultados experimentales cuando se tiene una configuración de dos electrodos cilíndricos coaxiales.

Los estudios realizados teniendo en cuenta el efecto del agua en la descarga tampoco dan una explicación firme, ya que como lo comprobó Pineda [8], si se utiliza agua destilada en los experimentos el modelo pierde su sentido. Pedro Pineda en su tesis también plantea dos modelos y de ellos el más acertado se basa en el principio utilizado por Liew y Darveniza en el cual se involucran ecuaciones exponenciales carentes de sentidos físico.

En este orden de ideas y basándose en el trabajo realizado por Vernon Cooray se propone un modelo temo-eléctrico que explique los resultados experimentales obtenidos por Pedro Pineda para una configuración de dos conductores cilíndricos coaxiales, teniendo en cuenta que el modelo de Liew y Darveniza que es el más reconocido actualmente no explica de manera apropiada este tipo de configuración.

En la construcción de este modelo se asumen las mismas condiciones descritas en el capitulo anterior y la explicación matemática se describirá a continuación.

DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA.

.

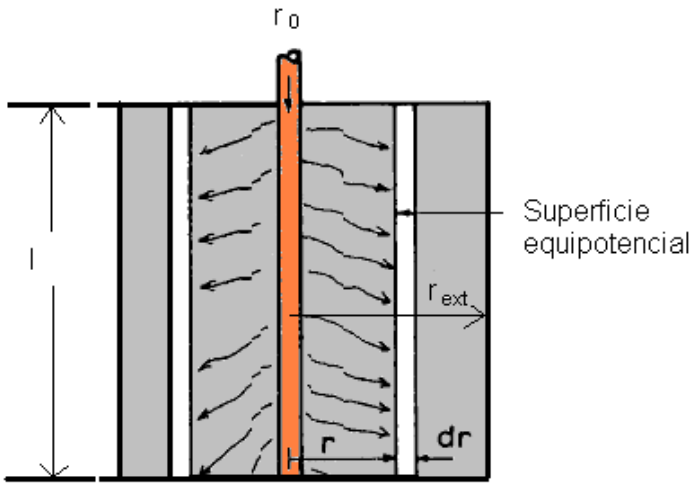



Figura 20: Superficies equipotenciales entre los conductores coaxiales

Cuando se supera la rigidez dieléctrica de los espacios de aire contenidos en la arena, se produce el fenómeno de disrupción y la resistencia que presenta en suelo en condiciones de no descarga empieza a cambiar en el tiempo. Dicha resistencia de descarga se puede obtener de la siguiente manera.

$$R(t) = \int_{r_{int}}^{rext} dR(t)dr + Rmin \qquad 5.1$$

Donde Rmin es el valor de la resistencia obtenida por Pineda en condiciones de descarga.

$dR(t)$ es la resistencia de un elemento de volumen localizado entre el radio externo e interno del cilindro coaxial. La ionización del aire en este elemento es iniciada en el tiempo $t_0$ en el cual la densidad de corriente del elemento sobrepasa el valor crítico. Para valores de $t \leq t_0$ la resistencia del elemento de volumen esta dado por:

$$dR(t < t_0) = \frac{dr}{\sigma_s(2\pi rl)} \qquad 5.2$$

Donde $\sigma_s$ es la conductividad del suelo.

De acuerdo con los supuestos concernientes a la fase de pre-descarga de la ionización, en el tiempo $t = t_0$ un volumen de aire de magnitud igual a $F[2\pi rldr]$ en este elemento de

volumen es inmediatamente llevado a la temperatura $T_0$. En consecuencia, la resistencia del elemento de volumen en $t = t_0$ cambiará a la ecuación dada a continuación.

$$dR(t = t_0) = \frac{dr}{(\sigma_s + F\{T_0/T_a\}\sigma_a(T_0)(2\pi rl)} \qquad 5.3$$

Donde $\sigma_a$ es la conductividad del aire, la cual es función de la temperatura. Para hallar la conductividad del aire en función de la temperatura se toma del trabajo realizado por Borovsky [9]

**Ahora se considera que pasa en el intervalo $\boldsymbol{t = t_0}$ a $\boldsymbol{t = t_0 + dt}$.**

El flujo de corriente a través del volumen de aire caliente disipará más energía conduciendo a un nuevo aumento de la temperatura y por ende a la conductividad del aire. La energía disipada en el volumen de aire durante este intervalo de tiempo está dada por:

$$dE = P * dt \qquad 5.4$$

$$P = \{I(t_0)\}^2 * dR \qquad 5.5$$

$$dR = \frac{dr}{(\sigma_s + F\{T_0/T_a\}\sigma_a(T_0))(2\pi rl)} \qquad .6$$

Entonces finalmente la energía disipada en Julios será:

$$dE = \frac{\{I(t)\}^2 drdt}{(\sigma_s + F\{T_0/T_a\}\sigma_a(T_0))(2\pi rl)} \qquad 5.7$$

En este modelo se asume que la disipación de calor desde dicho volumen hacia el suelo circundante es proporcional al volumen y la temperatura del aire caliente así:

$$dH = SF\{T_0/T_a\}(2\pi rl + 2\pi r^2)\, dr\, T_0 \qquad 5.8$$

Donde S denota la constante de proporcionalidad. En el modelo $T_0,\ F\ y\ S$ son parámetros que tienen que ser determinados por comparación de las simulaciones con los datos experimentales.

Así entonces el incremento en la temperatura del volumen de aire durante el intervalo de tiempo $dt$ es entonces:

$$\mathrm{Q} = \mathrm{m} \times \mathrm{c} \times \mathrm{dT} \qquad 5.9$$

$$dT = \frac{dQ}{m.c_p} = \frac{dE - dH}{m.c_p} \qquad 5.10$$

Sabiendo que:

$$m = \rho\, V \rightarrow m = \rho\, F\{T_0/T_a\}(2\pi r l)\, dr \qquad 5.11$$

Entonces:

$$dT = \frac{dE - dH}{m.c_p} = \frac{dE - dH}{F\{T_0/T_a\}(2\pi r l)\, dr\, \rho\, c_p} \qquad 5.12$$

Donde $\rho\ y\ c_p$ son la densidad del aire y el calor especifico respectivamente

# 6 RESULTADOS MODELO TERMO-ELECTRICO DE LA DESCARGA ELECTRICA EN ARENA BAJO IMPULSOS TIPO RAYO.

En los casos presentados a continuación se tomaron como base de comparación los resultados experimentales de Pineda y se ajustaron los valores de F, S y $T_a$ para reproducir los resultados mencionados. El modelo funciona para una señal de corriente inyectada por tal razón para cada caso se ajusto un pulso de corriente de acuerdo a los datos experimentales presentados por Pineda en su tesis. El calor específico y la densidad del aire se tomaron de la referencia [5]. La resistividad de la muestra utilizada ($\rho$), la resistencia en el estado de disrupción (Rmin) también fueron tomados de la tesis de maestría del Ingeniero Pedro Pineda.

Teniendo en cuenta lo anterior y mediante el código escrito en MATLAB se obtuvieron los resultados mostrados a continuación.

## 6.1 SIMULACIONES

Para todos los casos se emplean los siguientes datos:

$\mathrm{C_p} = (1001{,}67\mathrm{J/K.Kg})$ (Calor especifico del aire)

$\rho_0 = 1.225 Kg/\mathrm{m}^3$ (Densidad del aire)

$\mathrm{T0} = 3000\mathrm{K}$

$\mathrm{T_a} = 3000\mathrm{K}$

$\mathrm{r_0} = 0.0048\mathrm{m}$

$\mathrm{r_{ext}} = 0.127\mathrm{m}$

$\mathrm{l} = 0.7\mathrm{m}$

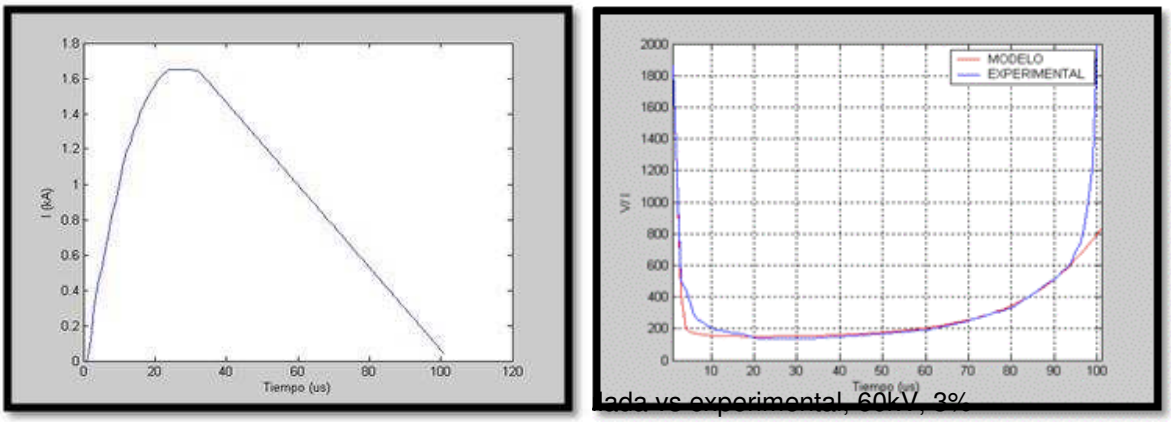
### 6.1.1 Contenido de humedad CH=3% voltaje aplicado 60kV

$\mathrm{F} = 0.085$

$\mathrm{S} = 6.56\ \mathrm{J/k.m}^3$

$\rho = 2500\Omega\mathrm{m}$

$\mathrm{R_{min}} = 138\Omega$




lada vs experimental, 60kV, 3%

### 6.1.2 Contenido de humedad CH=3% voltaje aplicado 80kV

F=0.085

S=5.346J/K.m$^3$

$\rho$=2500$\Omega$m

$R_{min}$=83$\Omega$

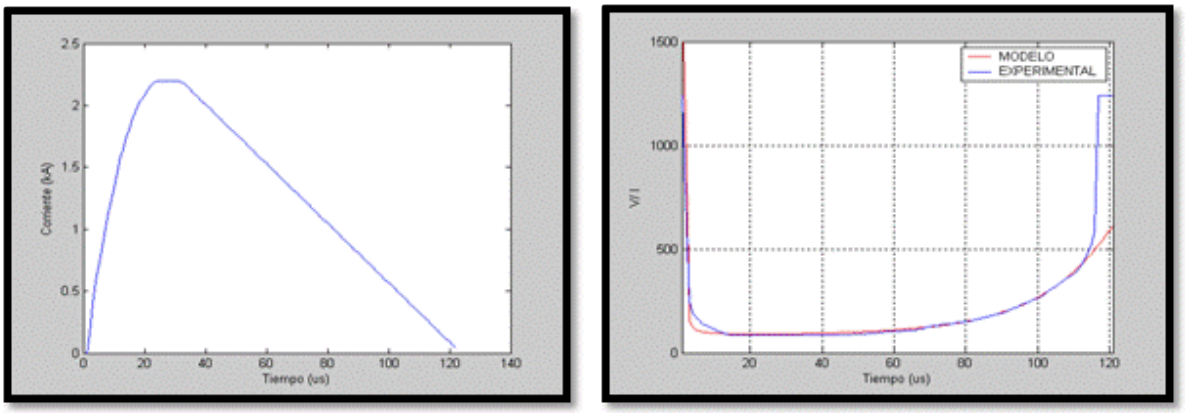



Figura 22: Comparación V/I calculada vs experimental, 80kV, 3%

### 6.1.3 Contenido de humedad CH=3% voltaje aplicado 120kV

F=0.085

S=5.249J/K.m$^3$

$\rho$=2500Ωm

$R_{min}$=43Ω

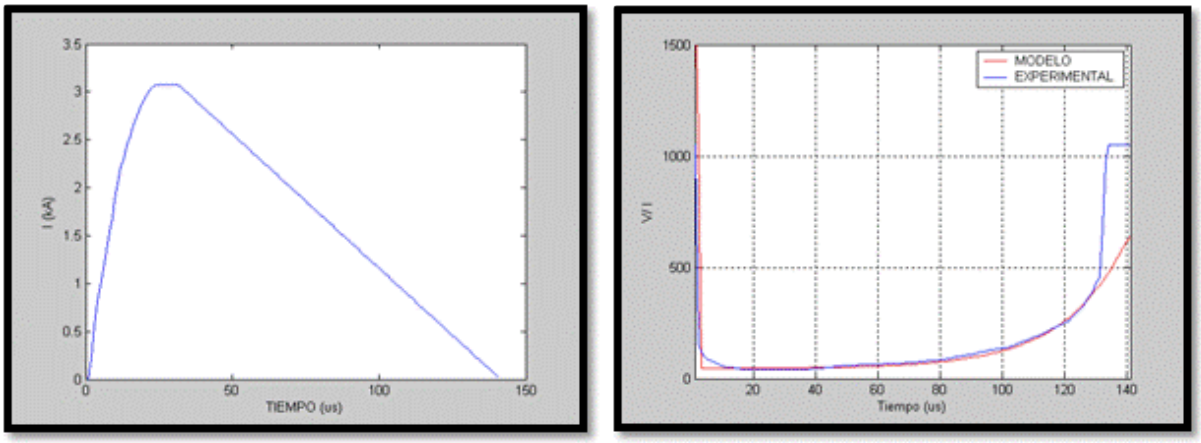



Figura 23: Comparación V/I calculada vs experimental, 120kV, 3%

### 6.1.4 Contenido de humedad CH=6% voltaje aplicado 50kV

F=0.065

S=4.617J/K.$m^3$

$\rho$=1100Ωm

$R_{min}$=156Ω

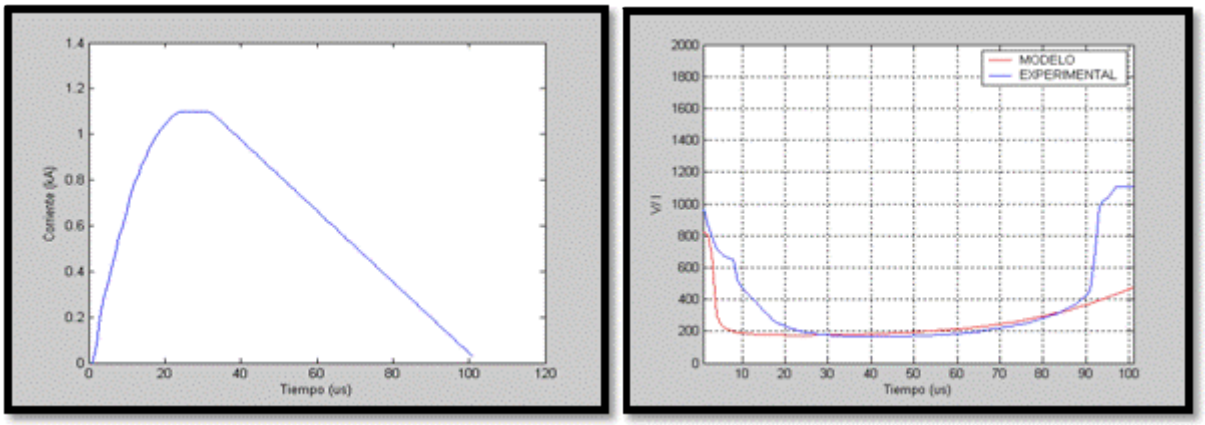



Figura 24: Comparación V/I calculada vs experimental, 50kV, 6%

### 6.1.5 Contenido de humedad CH=6% voltaje aplicado 80kV

F=0.065

S=7.29J/K.m$^3$

$\rho$=1100$\Omega$m

$R_{min}$=81$\Omega$

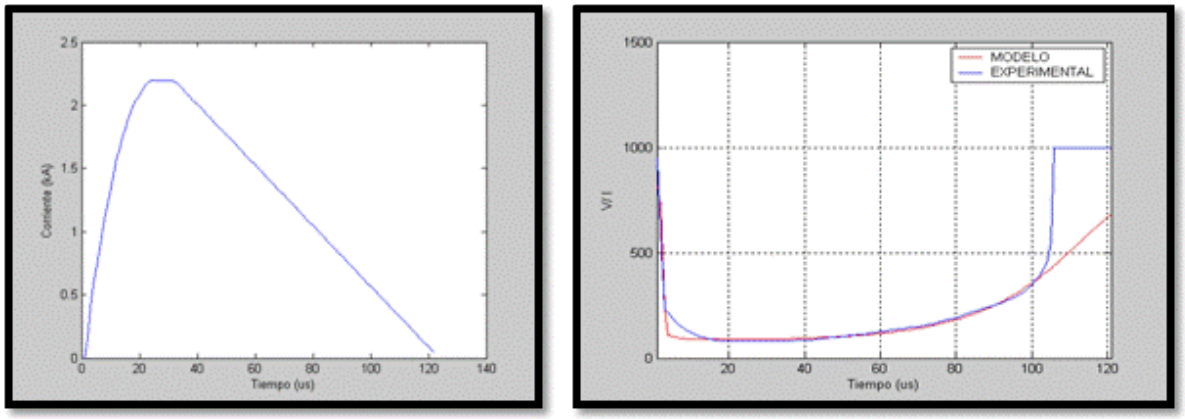



Figura 25: Comparación V/I calculada vs experimental, 80kV, 6%

### 6.1.6 Contenido de humedad CH=6% voltaje aplicado 120kV

F=0.065

S=6.95J/K.m$^3$

$\rho$=1100$\Omega$m

$R_{min}$=45$\Omega$

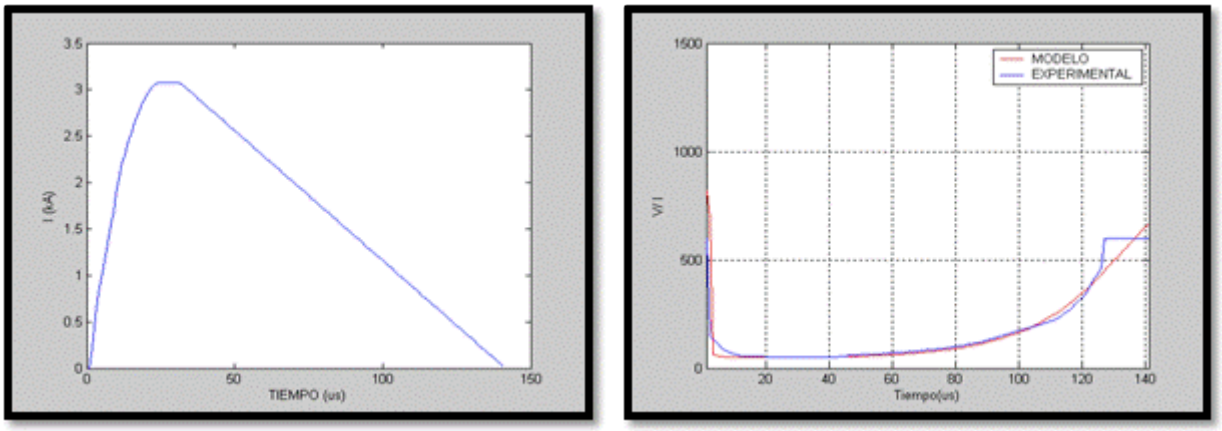



Figura 26: Comparación V/I calculada vs experimental, 120kV, 6%

### 6.1.7 Contenido de humedad CH=9% voltaje aplicado 90kV

F=0.035

S=5.95J/K.m$^3$

$\rho$=600$\Omega$m

$R_{min}$=76$\Omega$

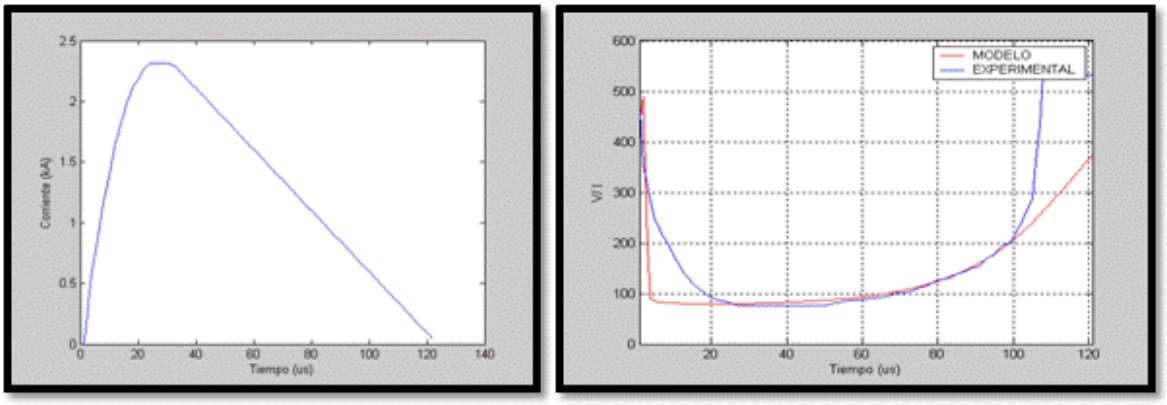



Figura 27: Comparación V/I calculada vs experimental, 90kV,9%

### 6.1.8 Contenido de humedad CH=9% voltaje aplicado 120kV

F=0.035

S=8.26J/K.m$^3$

$\rho$=600Ωm

$R_{min}$=48Ω

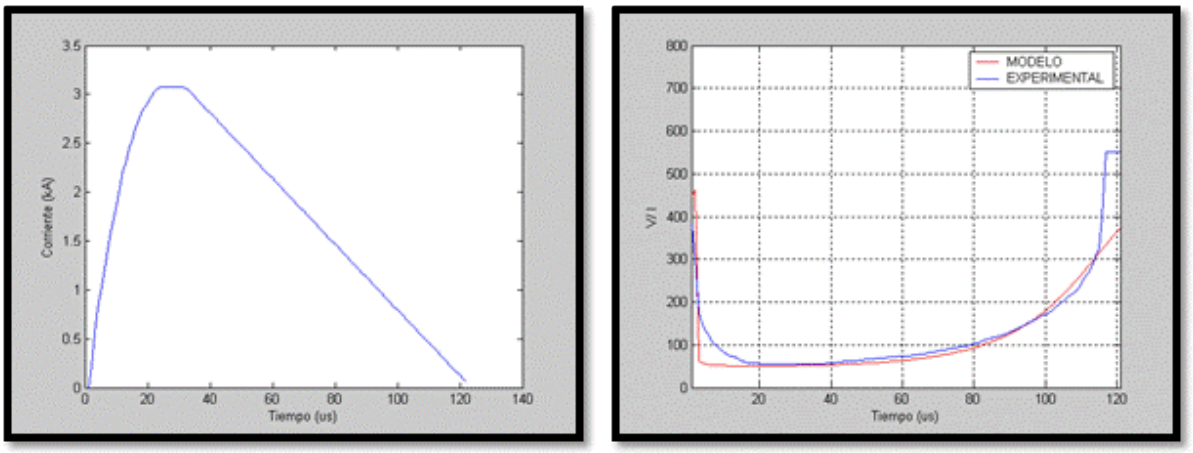



Figura 28: Comparación V/I calculada vs experimental, 120kV, 9%

### 6.1.9 Contenido de humedad CH=12% voltaje aplicado 70kV

F=0.025

S=9.72J/K.$m^3$

$\rho$=400Ωm

$R_{min}$=40Ω

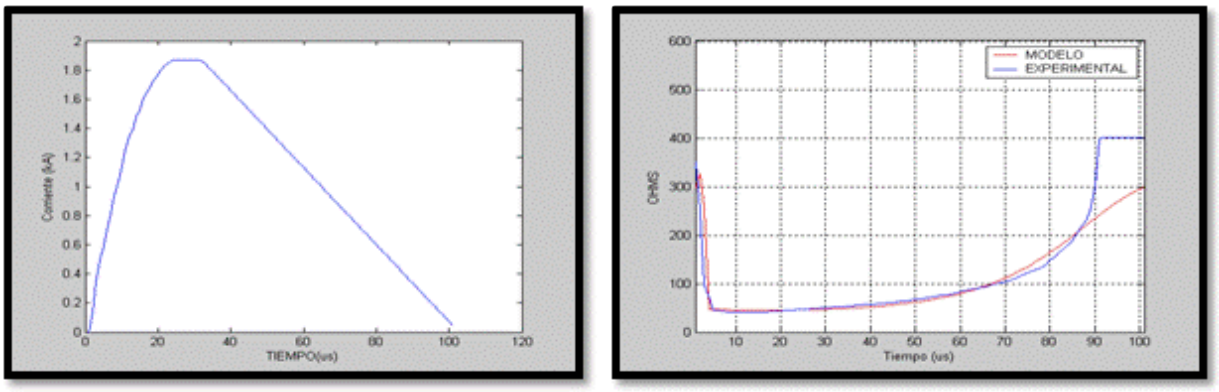



Figura 29: Comparación V/I calculada vs experimental, 70kV,12%

La resistividad para cada humedad se tomó de acuerdo a la siguiente gráfica experimental obtenida en la Tesis de Pedro Pineda (Figura 30)

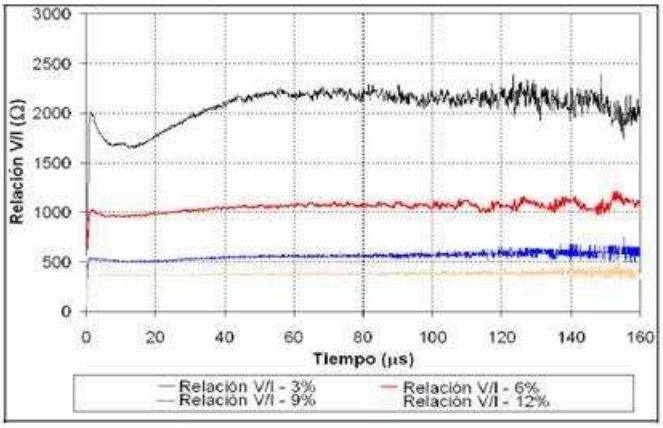



Figura 30: Resistividad para diferentes tipos de Humedad de la muestra.

## 6.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para analizar los resultados obtenidos se realiza una tabla donde se resumen los valores utilizados en cada caso de la siguiente forma.

| Caso | V Aplicado (kV) | CH | ρ (Ω-m) | F | S | R Min(Ω) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A | **60** | **3%** | **2500** | **0.085** | **6.56** | **138** |
| B | **80** | **3%** | **2500** | **0.085** | **5.35** | **83** |
| C | **120** | **3%** | **2500** | **0.085** | **5.25** | **43** |
| D | **50** | **6%** | **1100** | **0.065** | **4.62** | **156** |
| E | **80** | **6%** | **1100** | **0.065** | **7.29** | **81** |
| F | **120** | **6%** | **1100** | **0.065** | **6.95** | **45** |
| G | **90** | **9%** | **600** | **0.035** | **5.95** | **76** |
| H | **120** | **9%** | **600** | **0.035** | **8.26** | **48** |
| I | **70** | **12%** | **400** | **0.025** | **9.72** | **40** |

Figura 31: Resumen de resultados

Se observa que entre las variables involucradas en el modelo existe cierta correlación que puede ser utilizada para hallar funciones que nos permita hallar las variables no conocidas a partir de las conocidas para así poder utilizar el modelo para observar el comportamiento del terreno en otras condiciones en este tipo de configuración.

### 6.2.1 Obtención de la variable F a partir de CH

Se puede ver en la tabla que la variable F conserva un mismo valor para cada nivel de humedad presente en la arena, esto se puede justificar en el hecho que la variable F indica la cantidad de aire que se encuentra en la arena y esto depende de los espacios dejados por el agua, es por esto que a mayor humedad menores espacios de aire y por ende menor también será la constante F. Es así que por el método de mínimos cuadrados podemos obtener una relación que permita hallar el valor de la variable F a partir del contenido de humedad asi:

$$F = 185.19CH^3 - 38.889CH^2 + 1.6667CH + 0.065 \qquad 6.1$$

### 6.2.2 Obtención de la resistividad de la arena a partir de CH.

También es claro que la resistividad disminuye a medida que aumenta el porcentaje de humedad en la muestra, esto es lógico debido a la propiedad que tiene el agua de conducir electricidad. Aprovechando este hecho se puede plantear también una relación que nos permita hallar la resistividad desconocida de la muestra a partir del contenido de humedad.

$$\rho = 26.588CH^{-1.303} \qquad 6.2$$

### 6.2.3 Obtención de Rmin a partir del voltaje aplicado.

La resistencia Rmin fue obtenida experimentalmente por Pedro Pineda en su tesis y ella representa la resistencia más baja que presentó la muestra de arena después de haberse presentado la disrupción, de acuerdo a los resultados obtenidos, puede verse que ésta resistencia se ve principalmente afectada por el voltaje aplicado, también se observa que la humedad no juega un papel determinante en el valor de dicha variable. Sin embargo la anterior hipótesis solo es clara si no se tiene en cuenta el ultimo valor mostrado en la tabla, este valor se sale de la tendencia vista en los anteriores y podría ser consecuencia de una mala medición.

De esta forma y atendiendo las anteriores anotaciones la Resistencia mínima de descarga puede ser obtenida así:

$$R_{min} = 386.33e^{-0.018V} \qquad 6.3$$

Donde V es el voltaje pico aplicado.

### 6.2.4 Obtención de S.

A pesar de no contar con datos suficientes para poder determinar de manera definitiva una serie de ecuaciones que permitan obtener el valor de la constante S a partir de los datos conocidos, sí se puede realizar algunas aproximaciones que son visibles dentro del grupo de datos experimentales disponibles. En la figura 31 la tabla deja ver que para un determinado voltaje aplicado si la humedad aumenta también lo hace el valor de la constante S, al menos es claro para valores de voltaje aplicado de 80kV y 120kV, para los demás voltajes aplicados esto no se puede asegurar totalmente ya que solo se cuenta con un dato experimental para estos niveles de tensión y no se puede asegurar con determinación que este comportamiento se presenta. Dicho de esta forma se construye entonces dos ecuaciones que permiten encontrar el valor de la constante S a partir del voltaje aplicado y la humedad relativa de la muestra utilizada.

Para una tensión aplicada de 120kV:

$$S = 22.209CH^{0.4117} \qquad 6.4$$

Para una tensión aplicada de 80kV:

$$S = 25.594CH^{0.4464} \qquad 6.5$$

## 6.3 EJEMPLO SIMULACION A PARTIR DEL MODELO.

Con las ecuaciones obtenidas anteriormente, se realiza un ejemplo de lo que sería la utilización del modelo en la obtención de la curva de respuesta de la arena ante impulsos tipo rayo bajo una configuración de dos electrodos concéntricos de puesta a tierra.

En este caso se supone que se quiere obtener la respuesta del arreglo coaxial ante un impulso de tensión de 80kV y un porcentaje de humedad del 7%.

Para simular el comportamiento bajo estas condiciones debemos hallar las variables $\rho$, F, S y Rmin asi:

$$F = 185.19CH^3 - 38.889CH^2 + 1.6667CH + 0.065$$

$$F = 185.19(0.07)^3 - 38.889(0.07)^2 + 1.6667(0.07) + 0.065$$

✓ **F =0.0546**

$$\rho = 26.588CH^{-1.303}$$

$$\rho = 26.588(0.07)^{-1.303}$$

✓ $\boldsymbol{\rho = 850}$

$$R_{min} = 386.33e^{-0.018V}$$

$$R_{min} = 386.33e^{-0.018(80)}$$

✓ $\mathbf{R_{min} = 91.53}$

$$S = 25.594CH^{0.4464}$$

$$S = 25.594(0.07)^{0.4464}$$

✓ $\mathbf{S = 7.8}$

Luego de halladas las variables involucradas en el modelo se procede a realizar la simulación utilizando el código realizado para este fin, obteniendo el siguiente resultado:

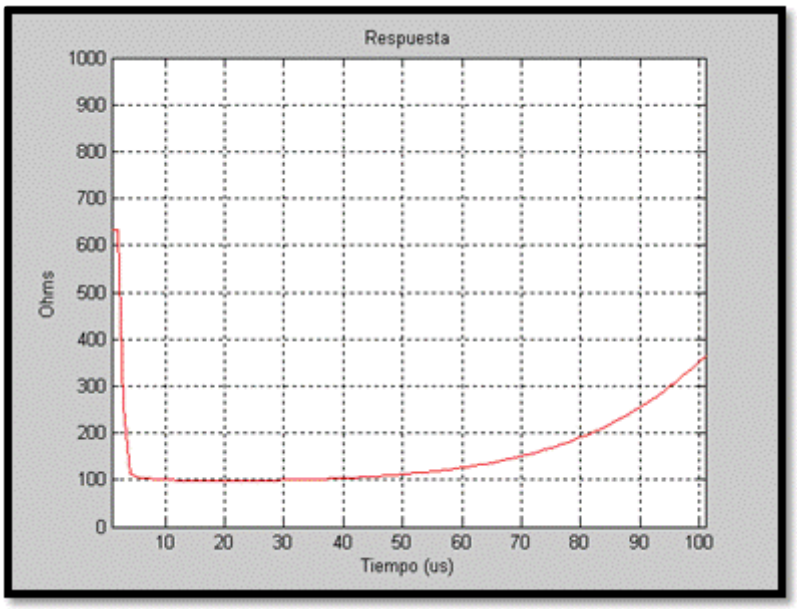



Figura 32: Resultado modelo

## DISCUSION, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo de investigación se ha hecho énfasis en como la arena componente del suelo, presenta un comportamiento no lineal ante la aplicación de ondas de voltaje tipo rayo. Esta no linealidad se presenta tanto en los estados de conducción como de disrupción conocidos por diversos estudios teóricos, entre los cuales, este trabajo ha hecho un especial énfasis, así como ha realizado un aporte significativo hacia el esclarecimiento de las características de la descarga en los suelos.

Se trabajó el concepto de no linealidad del suelo, realizando una resumida explicación de la composición del mismo y atribuyendo el comportamiento de este material a su composición física pero principalmente a su contenido de humedad y aire, se aprovechó el trabajo experimental y teórico realizado años atrás por investigadores nacionales e internacionales interesados en esclarecer la variación dinámica de la relación V/I, y por ende interesados en empezar a construir modelos de puesta a tierra con el fin de acercarse más claramente al efecto que tiene el suelo sobre la propagación de las ondas tipo rayo en los sistemas de distribución y transmisión.

Es claro que el entendimiento del comportamiento de la relación V/I dinámica a alta frecuencia y a alta corriente dará un giro completo a la forma como actualmente se modela el suelo, donde se realiza con una simple resistencia encontrada a baja frecuencia y bajas corrientes donde no ocurren fenómenos de ionización.

Se puede concluir que no ha sido fácil durante décadas esclarecer el comportamiento de los suelos en los sistemas de puesta a tierra, es así que en la industria no se tiene un claro conocimiento del real comportamiento de estos ante grandes corrientes inyectadas que son las que se presentan en un sistema de potencia y se diseñan sistemas de puesta a tierra basados principalmente en la norma IEEE80 donde se propone un procedimiento basado en una resistencia fija del suelo, que tendría que ser cambiada de encontrarse un modelo determinante que se acerque a resultados experimentales. Este tipo de trabajos por ende deben ser dados a conocer en las empresas que realizan este tipo de diseños para que empiece a cambiar el concepto que se tiene y se de la oportunidad de generar mas espacios de investigación en este efecto que es de gran importancia.

Como se vio entonces, y se pudo concluir años atrás el modelo de evaporización del agua fue descartado como posibilidad de explicar el atípico comportamiento de la resistencia dinámica del suelo, también en este trabajo de investigación se observó claramente que el modelo mas utilizado y reconocido hasta el momento Liew y Darveniza carece de sentido físico y no hay un procedimiento claro en la forma de encontrar las variables que hacen parte de dicho modelo, también este modelo no funciona muy bien en la configuración de dos cilindros coaxiales.

También se vio que si bien Pineda en su tesis de maestría realiza una serie de experimentos importantísimos y de gran aporte al estudio de este fenómeno, aporta también dos modelos y de ellos el más acertado al igual que el de Liew y Darveniza carece de sentido físico, además el modelo de Pineda involucra variables que son impredecibles teóricamente.

El trabajo de investigación realizado en esta Tesis de Maestría tenía el objetivo de ver el fenómeno desde otro punto de vista, involucrando principalmente el comportamiento térmico del aire contenido en la arena, es así que se estudió a profundidad un trabajo realizado en este sentido por el investigador Cooray quien planteó y desarrolló un modelo involucrando ecuaciones térmicas. El Modelo de Cooray no ha sido altamente difundido en nuestro país, pues no se tuvieron referentes de investigaciones basadas en él, fue así entonces que se tomó este modelo, se estudió en detalle, se buscaron las referencias que los autores utilizaron, incluyendo bibliografía no disponible en nuestro país y se escribió un código en MATLAB que simula los resultados obtenidos por Cooray en su paper.

Siguiendo con el desarrollo de este tema tan interesante, se tomaron los resultados experimentales obtenidos por Pineda en su tesis de maestría como referente de comparación de un modelo termo-eléctrico teniendo como base el modelo Cooray con algunas modificaciones aplicadas a la configuración de electrodos coaxiales experimentada por PINEDA, se escribió un código en MATLAB y se logró con bastante éxito reproducir los resultados experimentales obtenidos en dicha tesis, se logra entonces explicar el comportamiento de la muestra utilizada de una manera física coherente, se muestra que las variables involucradas en el modelo, presentan un comportamiento uniforme y coherente con respecto a los datos experimentales y sus variaciones tienen un sustento teórico bastante aceptable

La validación del modelo construido en este trabajo para cilindros coaxiales necesita ser corroborado por medio de mas trabajo experimental en este tipo de configuración, pues los obtenidos por Pineda como se vio son pocos para validar un modelo con determinación, por esto se propone como trabajo de investigación retomar la configuración que uso Pineda y realizar una serie de experimentos a diferentes contenidos de humedad y niveles de tensión y validar el resultado teórico obtenido en esta investigación.

También se propone investigar el papel de otras variables en el modelo construido, pues como se puede observar, el modelo termo-eléctrico planteado no tiene en cuenta entre otras variables el efecto de la frecuencia en el fenómeno y claramente como se plantea en algunas investigaciones realizadas por otros autores, la frecuencia del pulso de corriente inyectado dentro del suelo juega un papel determinante en el desarrollo del fenómeno estudiado.

Es importante decir que esta investigación abre la posibilidad inmediata de seguir avanzando en el conocimiento de este tipo de fenómeno partiendo del hecho que el comportamiento térmico del aire si es pieza fundamental y determina de manera contundente el comportamiento del suelo ante descargas, así pues se deja este trabajo a disposición de futuros investigadores interesados en seguir profundizando en este tema tan interesante y especialmente a aquellos que deseen afrontar el fenómeno desde el punto de vista eléctrico y termodinámico.

Se cuenta, a partir de ahora, con un modelo que podría ser ampliado y extendido aplicándolo a configuraciones y condiciones diferentes a las usadas en los experimentos aquí modelados. Se considera que el trabajo realizado en esta Tesis puede ser un paso importante para poder cumplir con el anhelo de la comunidad internacional de tener un modelo que corresponda con los muchos resultados experimentales obtenidos, teniendo una base física más aceptable

## BIBLIOGRAFIA


[1] A. C. Liew and M. Darveniza, “Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths,” *Proc. IEEE*, vol. 121, no. 2, pp. 123–135, 1974.

[2] Junping Wang, Ah Choy Liew*, Senior Member, IEEE*, and Mat Darveniza*, Life Fellow, IEEE. “*Extension of Dynamc Model of Impulse Behavior of Concentrated Grounds at High Currents” Vol. 20, No. 3, Julio 2005.

[3] V. Cooray, M. Zitnik, M. Manyahi, R. Montano, M. Rahman, Y Liu. “Physical model of surge-current characteristics of buried vertical rods in the presence of soil ionization” Journal of Electrostatics, 60 (2004), p. 193-202.

[4] A. Mendez, L. Roa. , Comportamiento térmico y eléctrico de la descarga eléctrica en arena bajo impulsos tipo rayo. Proyecto de Grado. Universidad Nacional de Colombia. Ingeniería Eléctrica 2003. Director: Ing. Antonio Mejía Umaña.

[5] Holman, J. P. Transferencia de calor. Compañía Editorial Continental, Mexico. Primera Edición. 1986.

[6] Mat Darveniza *“Electrical Properties of Wood and Line Design”*,. Universidad de Queensland, 1980.

[7] Pedro Pineda, Antonio Mejía Umaña, Francisco Amortegui et al *“Comportamiento disruptivo de Materiales Higroscópicos: madera, arena y concreto ante impulsos tipo rayo”.* . V Jornadas Latinoamericanas y II Iberoamericanas en Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico. ALTAE 2001. La Habana. Cuba. Agosto de 2001.

[8] Pedro J. Pineda P *“Comportamiento dinámico de los suelos ante la aplicación de ondas de impulso tipo rayo en un electrodo concentrado de puesta a tierra”.* Tesis de Maestría.., DIE - U.Nacional, 2004. Director: Ing. Antonio Mejía.

[9] Borovsky J.E., “*An electrodynamic description of lightning return strokes and dart leaders: guided wave propagation along conducting cylindrical channels, J. Geophys*’’. Res. 100 (1995) 2697–2726.

[10] Cabrera V. M., **“**Studies of ground ionization and lightning protection of power lines”,Doctoral dissertation at Uppsala University, 1992.

[11] Bellaschi P.L.,*"Impulse and 60 cycle Characteristics of Driven Grounds".* Transactions AIEE, Vol 60, pp 123-128. 1941.

[12] Sunde E.D., *"Earth Conduction Effects in Transmission Systems"*. D. Van Nostrand Company, Inc., pp 267-269. 1949.

[13] Flanagan T.M., Mallon C.E., Denson R., Leadon R.E., *"Electrical Breakdown Properties of Soil"*. IEEE Transactions on Nuclear Science, VOl. NS-28, No 6, pp. 4432-4439. 1981.

[14] Electric Power Research Institute, EPRI, *"Transmission Line Reference Book, 345kV and Above"*. Second Edition, Palo Alto California. 1982

[15] Snowden D. P., Erler J.W., *"Initiation of Electrical Breakdown of Soil by Water Vaporization*",IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-30, No. 6, December 1983

[16] Carslaw H. S., Jaeger J. C., *"Conduction of Heat in Solids*". Second Edition, Oxford at the Clarendon Press, 1959.

[17] A. Larsson, Inhibited electrical discharges in air, Ph.D.Thesis, University of Uppsala, Sweden, 1997.

# ANEXOS

## ANEXO A. CODIGO SIMULACIÓN RESISTENCIA DINAMICA DEL SUELO (MODELO COORAY)

```
clc
clear
syms r
dr=0.0018;
dt=0.000001
%Resistividad del terreno
Gs=0.0115;
%Ingreso de constante F, S, Calor especifico, T0, Ta, Radio conductor (r0)
%y longitud conductor
F=0.01;
S=10.2;
Cesp=1004.67
T0=3800;
Ta=3800;
r0=0.0127;
l=3.05;
%f=[6.2832 19.1637 -7.5317]
%roots(f)
%Vector Corriente
I=[0 1.7 3 4 5 6 7.2 8 8.6 9 9.6 9.8 10.1 10.25 10.5 10.7 10.75 10.8 10.8 10.7 10.5 10.2 9.9 9.6 9.3 9 8.7 8.4 8.1 7.8 7.5 7.2
6.85 6.4 6.1 5.7 5.3 4.9 4.5 4.1 3.8 3.5 3.1 2.8 2.5 2.2 1.9 1.7 1.4 1.2 1 0.9 0.8 0.7 0.65 0.6 0.55 0.45 0.35 0.25 0.15];
%curva experimental.
CE=[25 21 18.5 17 16 15 14.2 13.75 13.2 12.8 12.5 12 11.875 11.5625 11.4 11.3 11.25 11.2 11 11.01 11.02 11.04 11.06
11.06 11.12 11.16 11.2 11.25 11.3 11.35 11.41 11.47 11.54 11.62 11.7 11.79 11.89 11.99 12.1 12.23 12.37 12.58 12.81
13.07 13.34 13.64 13.96 14.31 14.68 15.07 15.48 15.9 16.34 16.8 17.2 17.7 18.2 18.63 19.07 19.5 20]
%Para hallar Rc
Eb=127000;
Jc=Gs*Eb;
KK=max(I)*1000/Jc;
f=[2*pi,2*pi*l,-KK]
Raices=roots(f)
Rc=Raices(2)
%primera parte de la integral para t=t0
DRs=1/(Gs*(2*pi*r*l+2*pi*r^2));
Rs=int(DRs,Rc,inf);
Rs=double(Rs);
ri=r0;
rx=r0
DRt=1/((Gs)*(2*pi*r*l+2*pi*r^2));
Rt=int(DRt,rx,Rc);
Rt=double(Rt);
rtt(1,1)=Rt;
Rtotal(1,1)=Rs+Rt
T0k(1,1)=T0
Ga=0
Gak(1,1)=Ga
%segunda parte de la integral para t=t0
for k=2:61
%Ecuacion de resistividad del aire en funcion de la temperatura
   if  ((T0>=2500) & (T0<=5000))
```

```
    Ga=(((9.3*10^-43)*(T0^14.25))/(9*10^11))*(100);
    end

    if  ((T0>=5000) & (T0<=9350))
    Ga=(((8.1*10^-25)*(T0^9.4))/(9*10^11))*(100);
    end

    if  ((T0>=9350) & (T0<=15000))
    Ga=(((3.3*10^0)*(T0^3.2))/(9*10^11))*(100);
    end

     if  (T0>=15000)
    Ga=(((7.6*10^8)*(T0^1.2))/(9*10^11))*(100);
    end
T0k(1,k)=T0
Gak(1,k)=Ga
DRt=1/((Gs+F*(T0/Ta)*Ga)*(2*pi*r*l+2*pi*r^2));
Rt=int(DRt,rx,Rc);
Rt=double(Rt);
rtt(1,k)=Rt;
Rtotal(1,k)=Rs+Rt
%Para t>0 DH
II(k)=((I(k)*1000)^2)
DH=((dr*dt*(I(k)*1000)^2))/((Gs+F*(T0/Ta)*Ga)*(2*pi*ri*l+2*pi*ri^2));
DH=double(DH);
DHk(1,k)=DH
%Para t>0 DU
DU=S*F*(T0/Ta)*(2*pi*ri*l+2*pi*ri^2)*dr*T0;
DU=double(DU);
DUk(1,k)=DU
%para t>0 dT
dT=((DH-DU)/(F*(T0/Ta)*(2*pi*ri*l+2*pi*ri^2)*dr*Cesp*1.225));
dT=double(dT);
T0=T0+dT
acumdT(1,k)=dT;
ri=ri+dr;
end
figure
plot(1:k,DHk,'r',1:k,DUk,'b'),axis([1 61 0 4])
title('DU Y DH')
figure
plot(Rtotal,'r'),grid on,axis([1 61 10 30])
title('RESISTENCIA TOTAL (OHMS)')
figure
plot(1:k,Rtotal,'r',1:k,CE,'b'),grid on,axis([1 61 10 30])
title('RESISTENCIA TOTAL (OHMS)')
figure
plot(acumdT),axis([1 61 -100 600])
title('Incrementos de temperatura "dT"')
figure
plot(1:k,I,'r',1:k,Gak,'b')
```

## ANEXO B. CODIGO SIMULACIÓN RESISTENCIA DINAMICA DE LA ARENA EN LA CONFIGURACIÓN DE DOS ELECTRODOS CILINDRICOS COAXIALES.

```
clc
clear
syms r
dr=0.001222;
dt=0.000001
%Resistividad de la arena
Gs=0.0004;
%Ingreso Constante F, S, Calor especifico, T0, Ta, Radio conductor interno
%(ro), longitud, radio conductor externo (rf), R minimo (Zmin)
F=0.085;
S=6.56
Cesp=1004.67
T0=3000;
Ta=3000;
r0=0.0048;
l=0.7;
rf=0.127
zmin=138
%Vector Corriente
I=0.15*[0 0.8 2 2.9 3.5 4.1 4.8 5.5 6 6.7 7.3 7.9 8.2 8.7 9 9.4 9.7 10 10.2 10.4 10.6 10.8 10.9 11 11 11 11 11 11 11 10.98
10.95 10.84 10.69 10.53 10.38 10.22 10.07 9.91 9.76 9.6 9.44 9.29 9.13 8.98 8.82 8.67 8.51 8.36 8.20 8.04 7.89 7.73 7.58
7.42 7.27 7.11 6.96 6.80 6.64 6.49 6.33 6.18 6.02 5.87 5.71 5.56 5.40 5.24 5.09 4.93 4.78 4.62 4.47 4.31 4.16 4 3.84 3.69
3.53 3.38 3.22 3.07 2.91 2.76 2.6 2.44 2.29 2.13 1.98 1.82 1.67 1.51 1.36 1.2 1.04 0.89 0.73 0.58 0.42 0.27]
%Para t=t0
DRt=1/(Gs*(2*pi*r*l));
Rt=int(DRt,r0,rf);
Rt=double(Rt);
ri=r0;
rx=ri;
rtt(1,1)=Rt
for k=2:101
   %Ecuacion de resistividad del aire en funcion de la temperatura
      if  ((T0>=2500) & (T0<=5000))
   Ga=(((9.3*10^-43)*(T0^14.25))/(9*10^11))*(100);
   end

   if  ((T0>=5000) & (T0<=9350))
   Ga=(((8.1*10^-25)*(T0^9.4))/(9*10^11))*(100);
   end

   if  ((T0>=9350) & (T0<=15000))
   Ga=(((3.3*10^0)*(T0^3.2))/(9*10^11))*(100);
   end

    if  (T0>=15000)
   Ga=(((7.6*10^8)*(T0^1.2))/(9*10^11))*(100);
   end
DRt=1/((Gs+F*(T0/Ta)*Ga)*(2*pi*r*l));
Rt=int(DRt,rx,rf);
Rt=double(Rt);
rtt(1,k)=Rt+zmin;
Gat(k)=Ga
T0t(k)=T0
%para t>0 DH
```

```
DH=((dr*dt*(I(k)*1000)^2))/((Gs+F*(T0/Ta)*Ga)*(2*pi*ri*l));
DH=double(DH);
DHk(1,k)=DH
%para t>0 DU
DU=S*F*(T0/Ta)*(2*pi*ri*l)*dr*T0;
DU=double(DU);
DUk(1,k)=DU
%para t>0 dT
dT=((DH-DU)/(F*(T0/Ta)*(2*pi*ri*l)*dr*Cesp*1.225));
dT=double(dT);
T0=T0+dT
acumdT(1,k)=dT;
ri=ri+dr;
end
%Curva experimental
Zexp=[1863 1181 500 450 370 290 250 240 220 210 190 190 183 178 173 170 167 158 148 145 140 138.5 138 138 138
138 138 138 138 138 138 138 139 140 141 143 145 147 149 150 151.9 153.8 155.8 157.6 159.6 161.53 163.5 165.3 167.3
169.2 171.5 173.8 176.1 178.5 180.7 183 185.3 187.7 190 192.3 198 203.84 209.6 215.4 221.15 226.92 232.69 238.46
244.23 250 258 266.15 274.23 282.3 290.4 298.46 306.54 314.62 322.7 330.78 348.7 366.62 384.54 402.46 420.4 438.3
456.23 474.15 492 510 536.35 562.7 589 615.4 687.5 733.66 842 1000 1250 2000 2500]
plot(1:k,rtt,'r',1:k,Zexp,'b'),grid on,axis([1 101 0 2000])
figure
plot(rtt),grid on
title('resistencia total'),grid on,axis([1 101 0 2000])
figure
plot(1:k,DUk,'r',1:k,DHk,'b'),axis([1 101 0 10])
title('DU y DH')
figure
plot(acumdT)
title('incrementos dt')
figure
plot(Gat)
title('GA')
figure
plot(T0t)
title('TO'),grid on,axis([2 101 2500 6000])
```