



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

---

---

**Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**Simulación de mecanismos de ruptura  
eléctrica en agua**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS CON  
ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA  
ELÉCTRICA

P R E S E N T A:

**Juan De Mauro Medina**



MÉXICO, D. F.

Junio, 2008



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**  
**SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO**

*ACTA DE REVISION DE TESIS*

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 17:00 horas del día 15 del mes de Abril del 2008 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.M.E. ZAC para examinar la tesis de grado titulada:

**“SIMULACIÓN DE MECANISMOS DE RUPTURA ELÉCTRICA EN AGUA”**

Presentada por el alumno:

**DE MAURO**  
Apellido paterno

**MEDINA**  
materno

**JUAN**  
nombre(s)

Con registro: 

A	0	6	0	1	3	0
---	---	---	---	---	---	---

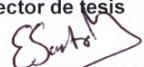
aspirante al grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

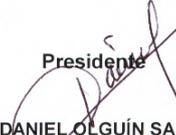
Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

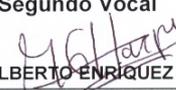
Director de tesis

  
DR. ELMER SANTOS MORA

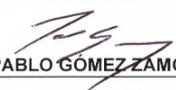
Presidente

  
DR. DANIEL OLGUÍN SALINAS

Segundo Vocal

  
M. EN C. GILBERTO ENRIQUEZ HARPER

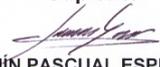
Tercer Vocal

  
DR. PABLO GÓMEZ ZAMORANO

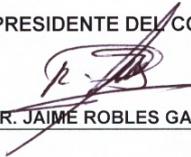
Secretario

  
DR. RICARDO OCTAVIO MOTA PALOMINO

Suplente

  
DR. FERMÍN PASCUAL ESPINO CORTES

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

  
DR. JAIME ROBLES GARCÍA





INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL  
COORDINACION GENERAL DE POSGRADOS E INVESTIGACION

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de México, Distrito Federal, el día 10 del mes de Junio del año 2008, el (la) que suscribe **Ing. Juan De Mauro Medina** alumno (a) del Programa de Maestría en Ciencias con especialidad en Ingeniería Eléctrica con número de registro A060130, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor(a) intelectual del presente Trabajo de Tesis bajo la dirección del **Dr. Elmer Santos Mora** y cede los derechos del trabajo intitulado: **Simulación de mecanismos de ruptura eléctrica en agua**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, graficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: [jdemauro06@ipn.mx](mailto:jdemauro06@ipn.mx); [esantos@ipn.mx](mailto:esantos@ipn.mx).

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

---

Juan De Mauro Medina  
Nombre y firma

# RESUMEN

La ruptura eléctrica en el agua comienza cuando la intensidad del campo eléctrico alcanza un valor determinado en una burbuja hemisférica, ésta se ioniza y la superficie líquida envolvente se calienta, es decir entra en proceso de ebullición con lo cual la burbuja aumenta de tamaño. La dinámica de la burbuja en el medio dieléctrico es: generación, expansión, contracción y colapso, que son las condiciones necesarias para la ruptura del medio dieléctrico, dando como resultado la formación del canal plasmático entre los dos electrodos.

En esta tesis se presenta un estudio sobre la ruptura eléctrica en agua, mediante la obtención del campo eléctrico para una configuración de electrodos planos paralelos, en el cual se ingreso una burbuja de gas en el centro del electrodo a tierra, utilizando para su análisis el software Quickfield en 2D. También se presenta el estudio sobre un par de burbujas inyectadas, así como la distorsión del campo eléctrico generado por un electrodo disparador (trigger). El estudio de la dinámica de la burbuja en el medio dieléctrico (agua), se basa en el análisis de la intensidad del campo eléctrico después de la propagación del streamer y de la avalancha electrónica.

En la investigación se observa que el valor de la intensidad del campo eléctrico es mucho mayor en la burbuja de gas que en el agua, esto es debido a sus diferentes permitividades, para el agua  $\epsilon = 81$  y para el gas dentro de la burbuja  $\epsilon = 1$ .

# ABSTRACT

The electric breakdown in the water begins when the of the electric field intensity reaches a specific value in a hemispherical bubble, which is ionized and the surface encircling liquid is heated, so it enters in a boiling process, with which the bubble increases its size. The dynamic of the bubble in the dielectric medium is: expansion, contraction and collapse, what are the necessary conditions for the breakdown of the dielectric medium, giving as a result the formation of the plasma channel between the two electrodes.

This thesis presents a study of the electric breakdown in water, by means of electric field calculation for a parallel plane electrode, in which a gas bubble was injected in the center of the earthed electrode, using the software Quickfield 2D. Also, a study about a couple of injected bubbles is presented as well as the distortion of the electric field generated by a trigger electrode. The study of the dynamics of the bubble in the dielectric medium (water), is based on the analysis of the electric field intensity after the propagation of the streamer and of the electronic avalanche.

In the investigation is observed that the intensity value of the electric field is a much higher in the gas bubble than in the water, this due to its different permittivities, namely for the water  $\epsilon = 81$  and for the gas inside of the bubble  $\epsilon = 1$ .

# ÍNDICE

	<b>Página</b>
Resumen.	i
Abstract.	ii
Índice.	iii
Lista de figuras.	iv
Glosario de términos	viii
<b>CAPITULO I.- INTRODUCCIÓN.</b>	<b>1</b>
1.1 Generalidades.	1
1.2 Planteamiento del problema.	3
1.3 Objetivos.	3
1.4 Justificación.	4
1.5 Estado del arte.	5
1.6 Estructura de la tesis.	8
<b>CAPITULO II.- MECANISMO DE LA RUPTURA ELÉCTRICA EN AGUA.</b>	<b>9</b>
2.1 Introducción.	9
2.2 Ruptura eléctrica en líquidos.	10
2.2.1 Ruptura térmica.	12
2.2.2 Ruptura eléctrica.	12
2.2.3 Ruptura termofibrosa.	13
2.3 Propiedades de los materiales aislantes líquidos.	14
2.3.1 Propiedades eléctricas.	14
2.3.2 Propiedades fisicoquímicas de los materiales aislantes líquidos.	15
2.3.3 Punto de flameo y de combustión.	15
2.3.4 Punto de congelación y descongelación.	16
2.4 El agua como aislante eléctrico.	17
2.5 Teoría de la ruptura en agua.	18
2.5.1 Modelos de ruptura en microsegundos.	18
2.5.2 Modelos de ruptura en sub-microsegundos.	18
2.5.2.1 Modelos electrónicos.	19
2.5.2.2 Teoría térmica.	20
2.5.2.3 Teoría de Jones y Kunhardt.	21
2.6 La ruptura de líquidos comerciales.	23
<b>CAPITULO III.- MECANISMO DE LA GENERACIÓN DE BURBUJAS.</b>	<b>25</b>
3.1 Introducción.	25
3.2 Tipos de generación de burbujas.	27
3.2.1 Generación de la burbuja por ignición (chispa eléctrica).	27
3.2.2 Generación de la burbuja por láser.	30
3.3 Fenómenos asociados con la generación de las burbujas.	32
3.3.1 Emisiones de luz.	32

3.3.2 Ondas generadas en el colapso de la burbuja.	34
3.4 Teoría de la dinámica de la burbuja esférica.	35
<b>CAPITULO IV.- ANÁLISIS Y RESULTADOS DEL MECANISMO DE LA RUPTURA ELÉCTRICA EN AGUA.</b>	<b>39</b>
4.1 Generalidades.	39
4.2 Simulación del campo eléctrico.	40
4.2.1 Simulación con una configuración de electrodos planos paralelos, usando como dieléctrico agua y gas en una burbuja hemisférica.	40
4.2.2 Resultados de la simulación del campo eléctrico.	41
4.3 Evento de prerruptura.	45
4.3.1 Tensión aplicada a través del gap de agua.	45
4.3.2 Intensidad del campo eléctrico en el gap principal después de la avalancha electrónica.	47
4.3.3 Streamer de prerruptura de una burbuja inyectada	49
4.3.4 Intensidad del campo eléctrico en el gap principal después de la avalancha electrónica	53
4.4.2 Intensidad del campo eléctrico, incluyendo distorsión del campo eléctrico (trigger), en el gap principal después de la avalancha electrónica.	
4.4 Simulación del campo eléctrico con una configuración de electrodos planos paralelos, incluyendo distorsión del campo eléctrico	54
4.4.1 Intensidad del campo eléctrico, incluyendo distorsión del campo eléctrico (trigger), después de la propagación del streamer dentro de la burbuja	57
4.4.2 Intensidad del campo eléctrico, incluyendo distorsión del campo eléctrico (trigger), en el gap principal después de la avalancha electrónica	
<b>CAPITULO V.- CONCLUSIONES, APORTACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.</b>	<b>60</b>
5.1 Conclusiones.	60
5.2 Aportaciones.	61
5.3 Recomendaciones para trabajos futuros.	61
<b>REFERENCIAS.</b>	<b>62</b>
<b>APÉNDICES.</b>	<b>68</b>
Apéndice 1. Manual practico del programa Quickfield.	68
Apéndice 2. Ecuación de Poisson.	75
Apéndice 3 Circuito equivalente del generador de impulso con una etapa.	76
<b>PUBLICACIONES.</b>	<b>81</b>

# LISTA DE FIGURAS

## Capítulo II

		Página
<b>Figura 2.1</b>	Comportamiento del factor de pérdidas de un aislamiento líquido en función de la tensión interelectródica.	11
<b>Figura 2.2</b>	Comportamiento del factor de pérdidas de un aislamiento líquido en función de la temperatura del medio.	11
<b>Figura 2.3</b>	Ruptura térmica, proceso de ebullición en el electrodo a tierra.	12
<b>Figura 2.4</b>	Ionización y polarización de pequeñas burbujas de aire, formando un canal conductor.	13
<b>Figura 2.5</b>	Ruptura de los líquidos, debido a fibras en suspensión.	13

## Capítulo III

<b>Figura 3.1</b>	Clasificación de los diferentes tipos de cavitación.	26
<b>Figura 3.2</b>	Sistema típico de la descarga del spark-gap.	28
<b>Figura 3.3</b>	Medición típica de voltaje y corriente de una ruptura cronométrica.	29
<b>Figura 3.4</b>	Dinámica de la burbuja, causada por una chispa eléctrica. El punto negro en el centro de la burbuja es debido al plasma producido por la chispa [9].	30
<b>Figura 3.5</b>	Arreglo experimental típico con cavidad óptica, con fotografía de alta velocidad. Para la fotografía de ondas de choque, se quita el difusor y se escoge una pequeña abertura del objetivo de cámara [42].	30
<b>Figura 3.6</b>	Generación de la burbuja y emisión de las ondas de choque de la ruptura, causado por un pulso de láser con foco Nd : YAG en agua. Con un retraso de tiempo entre el pulso generado y la iluminación del pulso aplicado: 9.5 ns, 13 ns, 69 ns, 107 ns y 157 ns. La emisión de luz brillante es debido al plasma producido por el láser [42].	31
<b>Figura 3.7</b>	Emisión de luz de una burbuja generada por láser en primeros colapsos, (sobrepuesto en la imagen es un contorno del tamaño máximo de la burbuja antes del colapso) [42].	32

<b>Figura 3.8</b>	Radio $R_1$ de la emisión de la mancha (diamantes) y número $N$ de fotones emitidos (cuadrados) como una función del radio máximo de la burbuja [42].	33
<b>Figura 3.9</b>	Esquema del fenómeno de sonoluminiscencia. De izquierda a derecha: aparición de una burbuja, expansión lenta, contracción rápida y emisión de luz.	34
<b>Figura 3.10</b>	Una simetría esférica de las ondas de choque emitidas por una burbuja generada por un láser en los primeros colapsos tomada a 20.8 millones de cuadros por segundo. El tiempo de la exposición es de 5 ns [42]	34

## Capítulo IV

<b>Figura 4.1</b>	Configuración de electrodos planos paralelos, para la simulación del campo eléctrico.	40
<b>Figura 4.2</b>	Intensidad del campo eléctrico sin ninguna curvatura en los bordes de los electrodos, a una tensión aplicada de 17 kV a una distancia de gap de 15 mm.	41
<b>Figura 4.3</b>	Intensidad del campo eléctrico con una curvatura en los bordes $r = 1.5$ mm, a una tensión aplicada de 17 kV a una distancia de gap de 15 mm.	41
<b>Figura 4.4</b>	Líneas equipotenciales, en el gap principal sin burbuja.	42
<b>Figura 4.5</b>	Líneas equipotenciales, en el gap principal con la burbuja.	42
<b>Figura 4.6</b>	Intensidad del campo eléctrico, con una tensión aplicada de 15 kV a una distancia de gap de 15 mm, con un radio de burbuja de 2.7 mm.	43
<b>Figura 4.7</b>	Intensidad del campo eléctrico, con valores diferentes de radios de crecimiento de la burbuja, con una tensión de 15 kV a una distancia de gap de 15mm.	44
<b>Figura 4.8</b>	Magnitudes características de una onda de choque, $T_s$ = tiempo de frente, $T_h$ = tiempo de cola, $V_s$ = valor de cresta.	46
<b>Figura 4.9</b>	Tiempos en que puede ocurrir la descarga.	46
<b>Figura 4.10</b>	Imagen de prerruptura capturada por una cámara de alta velocidad, con un voltaje de 16 kV a una distancia de gap de 8.7 mm [12].	47
<b>Figura 4.11</b>	Generación del streamer dentro de la burbuja.	47
<b>Figura 4.12</b>	Factor de intensidad del campo eléctrico del gap de agua. Después de la propagación del streamer en la burbuja, estableciendo un canal conductor en la burbuja.	48

<b>Figura 4.13</b>	Burbuja inyectada en el gap principal con una distancia de gap de 10 mm, a un voltaje de 16 kV [67].	49
<b>Figura 4.14</b>	Líneas equipotenciales, en el gap principal con una burbuja inyectada de radio 3 mm, a una distancia de gap 15 mm.	49
<b>Figura 4.15</b>	Líneas equipotenciales, en el gap principal con dos burbujas inyectada de radio 3 mm alineadas horizontalmente a una distancia de gap 15 mm.	50
<b>Figura 4.16</b>	Líneas equipotenciales, en el gap principal con dos burbujas inyectadas de radio 3 mm alineadas verticalmente, a una distancia de gap 15 mm.	50
<b>Figura 4.17</b>	Factor de intensidad del campo eléctrico del gap de agua. Incluyendo una burbuja inyectada, con un diámetro de 3 mm, con una tensión de 16 kV, a una distancia de gap de 10 mm.	51
<b>Figura 4.18</b>	Factor de intensidad del campo eléctrico del gap de agua. Incluyendo dos burbujas inyectadas en forma vertical, con un diámetro de 3 mm, con una tensión de 16 kV, a una distancia de gap de 10 mm.	51
<b>Figura 4.19</b>	Factor de intensidad del campo eléctrico del gap de agua. Después de la propagación del streamer en la burbuja inyectada de radio 3 mm.	52
<b>Figura 4.20</b>	Factor de intensidad del campo eléctrico del gap de agua. Con una burbuja inyectada por el electrodo a tierra y una burbuja generada en el electrodo a tierra, después de la propagación del streamer en la burbuja.	52
<b>Figura 4.21</b>	Factor de intensidad del campo eléctrico del gap de agua. Después de la iniciación de la avalancha en la burbuja.	53
<b>Figura 4.22</b>	Configuración de electrodos planos paralelos, para la simulación del campo eléctrico, incluyendo el electrodo del trigger para la distorsión del campo eléctrico.	54
<b>Figura 4.23</b>	Distribución de las líneas equipotenciales, para una tensión aplicada de 16 kV para un gap de 15 mm.	55
<b>Figura 4.24</b>	Intensidad del campo eléctrico, con una línea entre el gap del trigger al electrodo de alta tensión.	56
<b>Figura 4.25</b>	Magnitud del campo eléctrico dentro de la burbuja con y sin electrodo trigger.	56

- Figura 4.26** Imágen de ruptura en el gap de agua, con un voltaje aplicado de 16 kV con una distancia de gap de 8.7 mm [69]. 57
- Figura 4.27** Factor de intensidad del campo eléctrico del gap de agua. Incluyendo una burbuja hemisférica en el electrodo del trigger, después de la propagación del streamer en la burbuja. 58
- Figura 4.28** Factor de intensidad del campo eléctrico del gap de agua, incluyendo una burbuja hemisférica en el electrodo del trigger, después de la iniciación de la avalancha en la burbuja. 59

# GLOSARIO DE TERMINOS

**Streamer.** Canal ionizado que se registra como un pulso de corriente. El canal se origina por la conexión sucesiva de avalanchas electrónicas.

**Avalancha electrónica.** Proceso de multiplicación electrónica en el que cada electrón genera por impacto uno, dos o más electrones, debido a colisiones entre ellos; reacción en cadena.

**Spark-gap.** Par de electrodos separados por un aislante en el que ocurren descargas eléctricas, se usa como conmutador en alta tensión.

**Plasma.** Gas que comprende cantidades iguales de partículas cargadas positiva y negativamente, por lo que se masa es eléctricamente neutra; cuarto estado de la materia (sólida, líquida, gaseosa, plasma), capaz de conducir una fuerza magnética.

**Sonoluminiscencia.** Es un fenómeno físico caracterizado por la emisión de luz en líquidos sometidos a ultrasonidos. Según la teoría más aceptada el ultrasonido genera cavidades (burbujas) que colapsan rápidamente.

**Cavitación.** La cavitación o aspiración en vacío es un efecto hidrodinámico que se produce cuando el agua o cualquier otro fluido pasa a gran velocidad por una arista afilada, produciendo una descompresión del fluido.

**Efluvio.** Emisión de pequeñas partículas.

**Leaders.** Canal de descarga ionizado..

**Tiempo de retardo.** Tiempo que tarda en producirse la ruptura a partir del instante en que se aplica la tensión de impulso.

# CAPITULO I

## INTRODUCCION

### 1.1 Generalidades

Los aislantes líquidos desempeñan un papel muy importante en el desarrollo de las técnicas de aislamiento, debido principalmente a que tienen una rigidez dieléctrica relativamente alta. Las principales características de los aislantes líquidos son [1,2]:

- ✚ Propiedades físicas, como densidad, coeficiente de dilatación, conductividad térmica, calor, viscosidad, estas propiedades dependen de la constitución química de los diferentes aislantes.
- ✚ Propiedades dieléctricas, constante dieléctrica, rigidez dieléctrica que dependen de las impurezas disueltas en el líquido, o bien sustancias en suspensión como fibras o gotas de agua que aparecen durante la fabricación o uso.

La obtención de líquidos absolutamente puros es sumamente difícil y en éstos la ruptura de la rigidez dieléctrica obedece a la presencia de impurezas como agua, gases, sólidos en suspensión, etc. [2]. El efecto de estas impurezas es relativamente pequeño por un pulso de duración corto ( $10 \mu\text{s}$ ) [3].

En un sentido general, la ruptura eléctrica es el proceso de transformación de un material no conductor en conductor, mediante la aplicación de un campo eléctrico lo suficientemente intenso. Esto ocurre en un tiempo que varía entre  $10^{-9}$  y varios segundos, el rango usual es de  $10^{-8}$  -  $10^{-4}$  segundos [3]. Las teorías acerca de la ruptura en líquidos se aplican o son estrictamente válidas para aislantes depurados. Por ejemplo, las inclusiones gaseosas ocurre un recalentamiento del líquido, que lleva al desprendimiento de burbujas fáciles de ionizar. Este proceso conduce con frecuencia a la ruptura del medio. El agua, por su parte, no se mezcla a temperatura normal con el aceite, sino que se mantiene suspendida en forma de gotas muy pequeñas y aisladas. El campo eléctrico predominante puede fácilmente polarizar estas pequeñas gotas,

formándose así un ordenamiento de las mismas, que en la práctica no es otra cosa que una cadena de conductancia elevada, la cual, tarde o temprano, conduce también a la ruptura del medio [2,3,4].

La ionización y polarización del medio, conduce a la ruptura de la rigidez dieléctrica en los aislantes líquidos, de los cuales el que más se usa hasta el presente es el aceite [2,3,4]. La ruptura de la rigidez dieléctrica en aceites minerales, debido a la aparición de un arco eléctrico acompañado de una emisión luminosa intensa, se ha descrito hace ya más de un siglo por el físico inglés Michael Faraday [5,6].

Hay interés considerable en el estudio de la ruptura eléctrica en agua (y otros líquidos) por una variedad de razones, por ejemplo aplicaciones prácticas de líquidos dieléctricos incluyen gaps llenos de agua en equipos acústicos, el aislamiento de aparatos del alta tensión, uso en el almacenamiento de la energía y elementos de conmutación para sistemas de potencia pulsada [7].

Sin embargo, el interés del uso de agua para aplicaciones en alta tensión comenzó por la década de los 50's. Debido a su alta conductividad eléctrica, el agua es incapaz de soportar campos eléctricos intensos en tensión directa o alterna. Sin embargo, bajo la aplicación de pulsos de tensión su campo de ruptura puede ser relativamente alto con una constante dieléctrica alta; estas propiedades le hacen un medio satisfactorio como dieléctrico en aplicaciones de potencia pulsada. Por consiguiente hay un interés considerable en el mecanismo que causa la ruptura en gap de agua [7,8].

En años recientes, las descargas eléctricas pulsadas en el agua se han usado en varias aplicaciones tales como: fuentes de sonido bajo agua, esterilización, conmutación (switch) y ha sido propuesta para realizar su purificación química y biológica. Cuando se aplica un voltaje alto entre los electrodos se produce una descarga, una emisión de luz y una chispa o un streamer. Diversas especies activas (radicales libres, ozono, etc.) pueden formarse durante la propagación de un streamer y esto puede jugar un papel muy importante para la eliminación de bacterias o para la degradación de compuestos orgánicos [7,8,9,10].

## 1.2 Planteamiento del Problema

Ya que en ocasiones no se cuenta con un laboratorio de alta tensión equipado, que nos pueda brindar los niveles de tensión necesarios para la realización de las distintas pruebas, el uso de simuladores en Ingeniería Eléctrica representa una gran ventaja para el estudio de distintos fenómenos en alta tensión. No obstante, para que la simulación sea correcta, los parámetros deben modelarse de tal forma que describan de manera precisa el fenómeno en estudio. En general, el grado de complejidad requerido en la simulación depende del tipo de análisis que se requiera.

Para el caso de estudio de la ruptura eléctrica en agua, a partir de la aplicación de un pulso de energía, puede producirse la ruptura. La ruptura de la rigidez dieléctrica de un espacio o configuración interelectródica depende de la presión y la distancia que separa a los electrodos involucrados. Una ruptura eléctrica puede producirse si las condiciones son tales que un streamer pueda generarse y propagarse totalmente hasta el electrodo opuesto.

Para el estudio del streamer se requiere de la puesta en marcha de diversas y complejas técnicas experimentales; de las cuales algunas son clásicas y otras más específicas, pero con la ayuda de programas de simulación de campo eléctrico como: Maxwell 2D, Ansoft Co., Pittsburg, CALIIE\_2D y QuickField, los cuales proporcionan las condiciones necesarias para el estudio de la generación y propagación del streamer.

## 1.3 Objetivos

### Objetivo General

Contribuir al conocimiento sobre la ruptura eléctrica en agua investigando las razones y factores que influyen para dicho evento.

## **Objetivos Particulares**

Simular el mecanismo de ruptura eléctrica en agua, mediante la obtención del campo eléctrico.

Determinar el efecto de la burbuja de gas existente en el medio dieléctrico y la dinámica de la misma para la ruptura eléctrica.

Determinar el efecto de la distorsión del campo eléctrico para la ruptura eléctrica.

Compara los resultados obtenidos con resultados experimentales reportados en la literatura.

### **1.4 Justificación**

La conducción eléctrica y el fenómeno de la ruptura dieléctrica en líquido dieléctricos han sido estudiados por muchos años. Sin embargo, no se han clarificado sus mecanismos completamente hasta ahora, sobre todo en la región de campos eléctricos altos cerca de la ruptura. La estructura de líquido no es tan simple ni tan regular como el caso de sólidos cristalinos y tampoco es completamente variable como en el caso de los gases; el análisis teórico de los resultados no es simple. El hecho del que el líquido se contamina con varias impurezas, representa un serio problema para los estudios fundamentales. La transición de la fase líquida a la fase del gas se produce durante el desarrollo de la ruptura lo cual complica el estudio de los fenómenos y su interpretación.

En la ruptura eléctrica en líquidos, se genera una burbuja como resultado de la aplicación de un pulso de energía el cual es suficiente para vaporizar el líquido. La generación de una burbuja se realiza por varios procesos tales como: impulsos acústicos, materiales químicos explosivos, chispas eléctricas y el uso de láser.

Recientemente, se han desarrollado técnicas de medición de grandes velocidades eléctricas y ópticas y se han mejorado los métodos de la purificación de líquidos. Por

consiguiente, los estudios experimentales del desarrollo de la ruptura con resolución del tiempo extremadamente corto y los procesos electrónicos fundamentales han progresado fuertemente.

Debido a lo anterior, con la ayuda de programas de simulación que existen actualmente: Maxwell 2D, Ansoft Co., Pittsburg, CALIIE\_2D y QuickField, son de gran ayuda para el estudio de la ruptura eléctrica, mediante la simulación del campo eléctrico; que se basan en el análisis del elemento finito. Los cuales nos brindan resultados de manera eficiente que nos ayudan a complementar con los resultados experimentales reportados en la literatura.

### **1.5 Estado del Arte**

El estado general del conocimiento en la ruptura eléctrica en líquidos es menos avanzado que en el caso de los gases o sólidos. La conducción y la ruptura eléctrica en líquidos han sido estudiadas desde hace ya varias décadas, pero los hallazgos y conclusiones de muchos trabajos no se pueden recopilar, así se produce una teoría general aplicable para líquidos, como datos independientes que varían y algunas veces son contradictorios. La razón principal de esta situación es la falta de teoría comprensiva acerca de la base física del estado del líquido que formaría la estructura del esqueleto en el que se puedan comparar observaciones y relacionarlas.

Revisiones comprensivas de los datos publicados sobre el tema, tienen que hacerse periódicamente, las cuales incluyen las revisiones de Lewis (1959), Sharbaugh y Watson (1962), Swann (1962), Kok (1961), Krasucki (1968), Zaky y Hawley (1973) y Gallagher (1975) [4]. El trabajo cae ampliamente en dos escuelas de pensamiento. En primer lugar aquel que trata de explicar la ruptura de líquidos basados en un modelo que es una extensión de la ruptura en gases, basado en la avalancha de ionización de los átomos causado por la colisión del electrón en el campo aplicado. En segundo lugar se asume que los electrones salen del cátodo en el líquido por una emisión del campo, o por el campo termoiónico expandido: efecto de Schottky [4].

Se ha reconocido por mucho tiempo que la presencia de partículas extrañas en los aislantes líquidos tiene un efecto profundo en la ruptura eléctrica, estas partículas suspendidas son polarizadas, dando esto una permitividad más alta en el líquido [14].

Las impurezas pueden ser también por burbujas gaseosas de menor rigidez dieléctrica en el líquido. En el caso de la burbuja la ruptura total de los líquidos puede ser por un disparo.

En 1995 G.L. Chahine *et al.* [9], generó una herramienta de simulación, el cual consta de un laboratorio a escala para generar burbujas por ignición bajo el agua, el cual los resultados mostrados son obtenidos en base a la utilización de una cámara fotográfica de alta velocidad, para observar la dinámica de la burbuja en el medio.

En 1996 Werner Lauterborn y Claus-Dieter Ohl [43], mostraron el estudio de la dinámica de la burbuja en el medio dieléctrico, el estudio se realizó en base a un pulso de láser dirigido a un área en un recipiente con agua, mostrando la dinámica de la burbuja por imágenes tomadas por una cámara de alta velocidad de 75,000 cuadros por segundo, esto es debido a la gran velocidad a la que ocurre el fenómeno; con estas imágenes se logró determinar el radio máximo de la burbuja antes del colapso que fue de 2 mm.

En 1997 A. Jeffrey *et al.* [49], implementaron un modelo para la burbuja generada por ignición usando las ecuaciones desarrolladas de Lezzi y Prosperetti en 1986 y 1987. El modelo se basa en la dinámica de la burbuja: generación, crecimiento, contracción y colapso, así como la presión que existe dentro de la burbuja.

En 1999 Thomas Kurz *et al.* [42], presentaron un estudio experimental de la emisión de luz y el sonido de la burbuja, generada por un láser, la observación óptica se logró utilizando una cámara de alta velocidad, el cual se muestra la dinámica de la burbuja a diferentes tiempos dados en nano-segundos, así como la dinámica de la misma por ondas de choque.

En el 2001 T. Aka-Ngnui y A. Beroual [48], implementaron un modelo matemático utilizando el análisis de la dinámica de la burbuja sumergida en el líquido dieléctrico sujeta a un campo eléctrico divergente, en el cual para su modelo la burbuja tubo la siguiente dinámicas: i) expansión/colapso ( $e^{\lambda t}$ ), ii) expansión/colapso ( $e^{\pm j\omega t}$ ).

En el 2002 M. M. Góngora-Nieto *et al.* [68], mostraron el análisis del campo eléctrico sobre la burbuja en el líquido dieléctrico, en base a simulaciones realizadas con el software Maxwell; el cual para una mejor visualización del efecto de la burbuja para la ruptura eléctrica, presentan niveles de campo eléctrico para un par de burbujas inyectadas en el medio.

En el 2003 A. R. Naji Meidani y M. Hasan [15], presentaron un modelo matemático, combinado con un modelo físico, con respecto a las características del crecimiento de la burbuja en el líquido, en base al ultrasonido. El efecto del modelado son con respecto al radio inicial de la burbuja, la concentración inicial del gas disuelto en el líquido y la amplitud y frecuencia impuesta por el ultrasonido.

En el 2003 M. Saniei *et al.* [12], presentaron el mecanismo de la ruptura eléctrica en agua, para una configuración de electrodos planos paralelos, presentando resultados en base a la influencia de la burbuja de gas en el medio dieléctrico, mostrando la generación y propagación del estreamer dentro de la burbuja generada en el electrodo a tierra.

En el 2004 M. Sniei *et al.* [69], presentaron un estudio sobre la distorsión del campo eléctrico, en base a un electrodo disparador (trigger) en el electrodo a tierra, en el cual se observa que una burbuja es generada en dicho electrodo, con lo cual se tiene una ruptura eléctrica mas controlada.

En el 2006 J. Nieto Salazar *et al.* [5], presentaron un estudio experimental del fenómeno de la generación y propagación del streamer en agua en un arreglo de electrodos punta plano, en el cual se muestra que la ruptura eléctrica puede producirse o no, dependiendo del pulso de tensión aplicado.

El interés del uso del agua para su aplicación en alta tensión empezó alrededor de los 1950`s. La razón por este interés del agua es que la conductividad eléctrica del agua es de al menos de  $0.054 \mu\text{s/cm}$  para el agua teóricamente pura y mucho más elevada en presencia de sales disueltas. Sin embargo, en razón de su permitividad excepcionalmente elevada ( $\epsilon_r = 81$ ), esto es aproximadamente de 30 a 40 vez más alto que la de otros materiales aislantes, en particular estas propiedades hacen que el agua sea un buen candidato para su uso como dieléctrico [6].

### **1.6 Estructura de la Tesis**

El capítulo I se presenta los objetivos de la tesis, algunos antecedentes sobre el tema, justificación, planteamiento del problema, estado del arte y el capitulado que persigue este trabajo.

El capítulo II se describen las propiedades eléctricas, fisicoquímicas de los aislantes líquidos, proporcionando también las diferentes teorías para la ruptura eléctrica, así como los diferentes mecanismos de ruptura eléctrica en agua y el uso del agua como aislante eléctrico.

El capítulo III contiene los diferentes mecanismos para la generación de la burbuja esférica en el medio dieléctrico, así como la teoría de la dinámica de la burbuja y su importancia para la ruptura eléctrica del medio.

El capítulo IV se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas en la configuración de electrodos planos paralelos, con la presencia de una burbuja en el electrodo a tierra, mostrando así los niveles de intensidad del campo eléctrico en los dos medios con el uso de permitividades diferentes.

El capítulo V se presentan las conclusiones generales, así como las aportaciones y recomendaciones para trabajos futuros. Los apéndices A.1, A.2, A.3 complementan la información necesaria para este trabajo.

# **CAPITULO II**

## **MECANISMO DE RUPTURA ELÉCTRICA EN AGUA**

### **2.1 Introducción**

La ruptura eléctrica propiamente dicho arco eléctrico, consiste en una descarga autosostenida, capaz de generar por sí misma la cantidad de iones y electrones necesarios para el transporte de la corriente en el seno de la masa gaseosa [5,6]. Se distingue de la descarga independiente por efluvios, y por la densidad de corriente del orden de varios MA/cm<sup>2</sup>. La causa de esta diferencia comienza del proceso que se desarrolla en el cátodo, especialmente por la manera de producirse el desprendimiento de los portadores de cargas que parten del mismo. Cuando se trata de efluvios, la liberación de electrones se produce bajo los efectos del bombardeo debido a los iones positivos, en el caso del arco la liberación de electrones se produce bajo los efectos del bombardeo debido a los iones positivos en el caso del arco la liberación ocurre en parte, por razón de un proceso infinitamente más eficaz, como es la emisión directa desde el cátodo por termoemisión [5,6,11,12].

La temperatura necesaria para alcanzar este estado de actividad la provoca el arco mismo, a través de la delgada zona del intenso campo eléctrico que aparece delante de dicho electrodo y en el cual, los iones positivos libres que van llegando, experimentan una enorme aceleración, calentando fuertemente con sus impactos el metal del electrodo catódico. De este modo, el arco se mantiene por simple emisión térmica, como se ha podido observar en electrodos de carbón y de tungsteno que presentan una superficie absolutamente limpia [4,11].

En el campo de tensión catódica se establece una zona de transición, el espacio flameante, siguiendo después la columna del arco que ocupa la mayor parte del desarrollo longitudinal del mismo. La columna presenta un voltaje por unidad de longitud, constante y esta formada por electrones y iones en igual número [2,3,4]. El transporte de cargas es debido, casi exclusivamente, a los primeros por tener una masa

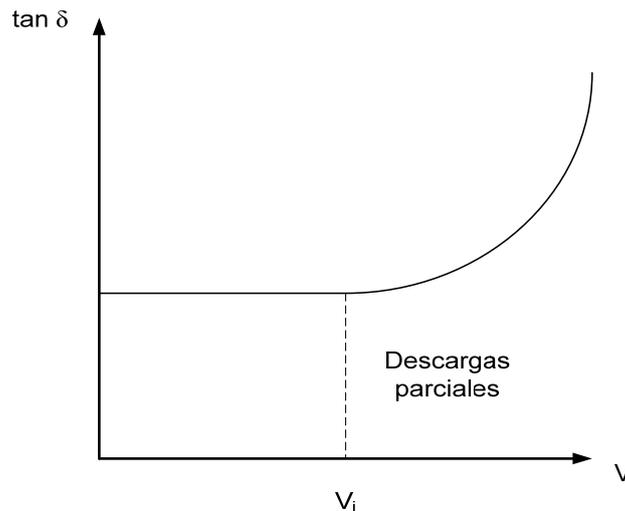
mucho menor y mayor velocidad (del orden de 16800 m/s a 6000 °K y con 60 V/cm) [11]. La columna se compone principalmente de moléculas gaseosas y no de moléculas metálicas, por efecto de la difusión. Su temperatura interior llega a 6000 – 40000 °K. Con fuertes intensidades de descarga de condensadores, unos  $10^6$  A, se han llegado a medir 500000 °K. Esto se presenta al transporte de iones y electrones en la masa gaseosa; es decir, de la circulación de la corriente, análogamente que en el caso de un conductor metálico o, mejor aún, líquido [11,12,13,14].

### **2.2 Ruptura eléctrica en líquidos**

El estado general del conocimiento en la ruptura eléctrica en líquidos es menos avanzado que en el caso de gases o aún en sólidos. Muchos aspectos de la ruptura líquida han sido investigados en las últimas décadas, sin embargo los descubrimientos y conclusiones de los muchos trabajos no pueden ser recopilados y tampoco reproducir una teoría general aplicable a líquidos, dado que los datos independientes están en variación y son a veces contradictorios. La razón principal para esta situación es la falta de teoría integral concerniente a la base física del estado líquido que formaría la estructura del esqueleto en la que las observaciones podrían ser comparadas y podrían ser relacionadas [4,15].

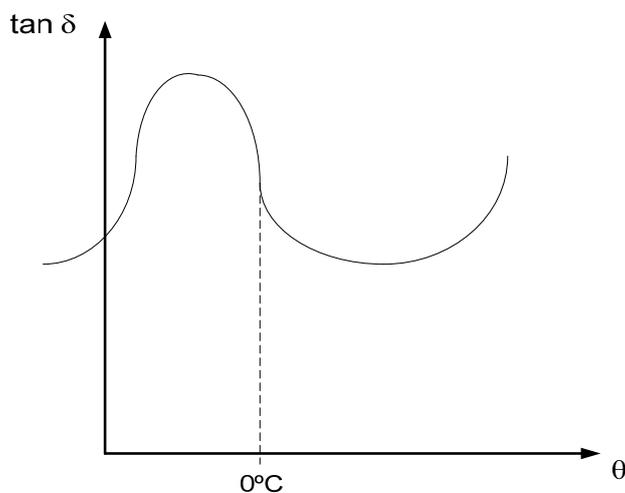
Por mucho tiempo ha sido reconocido que la presencia de partículas extrañas en el aislante líquido tiene un efecto profundo en la fuerza de ruptura de líquidos. Es decir, principalmente la ionización y polarización del medio conducen a la ruptura de la rigidez dieléctrica en los aislantes líquidos. Como consecuencia experimentan una fuerza eléctrica direccionada hacia el lugar de tensión máxima [15]. Con electrodos uniformes el movimiento de partículas es iniciado por irregularidades de la superficie en los electrodos, el cuál da lugar a los gradientes locales del campo. La acumulación de partículas continuas y tiende a formar un puente a través del gap que conduce a la iniciación de la ruptura. Las impurezas también pueden ser burbujas gaseosas de fuerza inferior de ruptura en líquidos, en cuyo caso la ruptura de la burbuja y la ruptura total del líquido puede desencadenarse. Un modelo matemático para la ruptura de la burbuja ha sido propuesto por Kao [15,16].

Las pérdidas dieléctricas ( $\tan \delta$ ) de los aislantes líquidos dependen de la tensión prevaleciente en el espacio interelectródico y de la temperatura del medio. En las figura 2.1 y 2.2 se muestran tales dependencias. La tensión  $V_i$ , de la figura 2.1 indica el valor a partir del cual ocurren descargas parciales en el medio, aumentando considerablemente, las pérdidas dieléctricas por ionización. Es posible, además, que este proceso conduzca a una variación del gradiente eléctrico dentro del medio aislante, debido a la variación de su conductividad electrolítica [2,4,17,18].



**Figura 2.1** Comportamiento del factor de pérdidas de un aislamiento líquido en función de la tensión interelectródica.

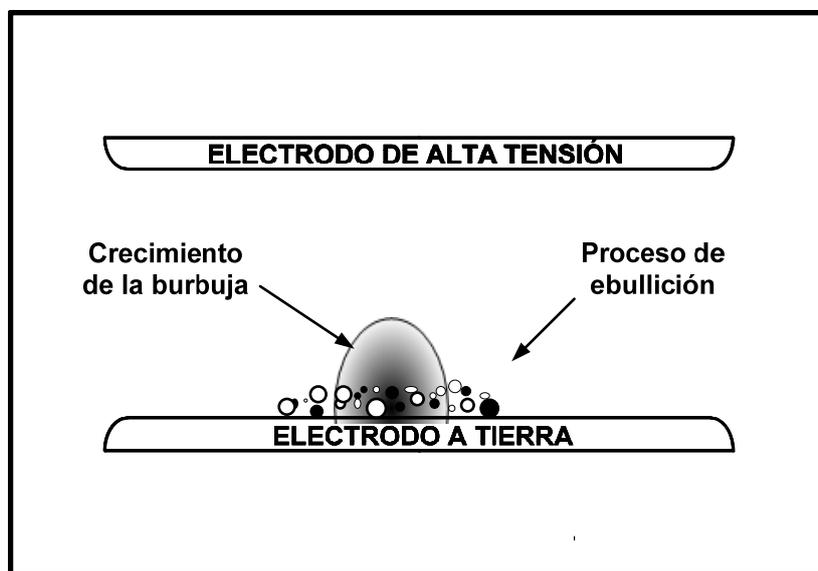
En la figura 2.2 se muestra la dependencia de las pérdidas de la temperatura  $\theta$ . Este trayecto característico permite establecer el valor de  $\theta$  que exceda las pérdidas por ionización a las que se originan por polarización [14,19].



**Figura 2.2** Comportamiento del factor de pérdidas de un aislamiento líquido en función de la temperatura del medio.

**2.2.1 Ruptura térmica**

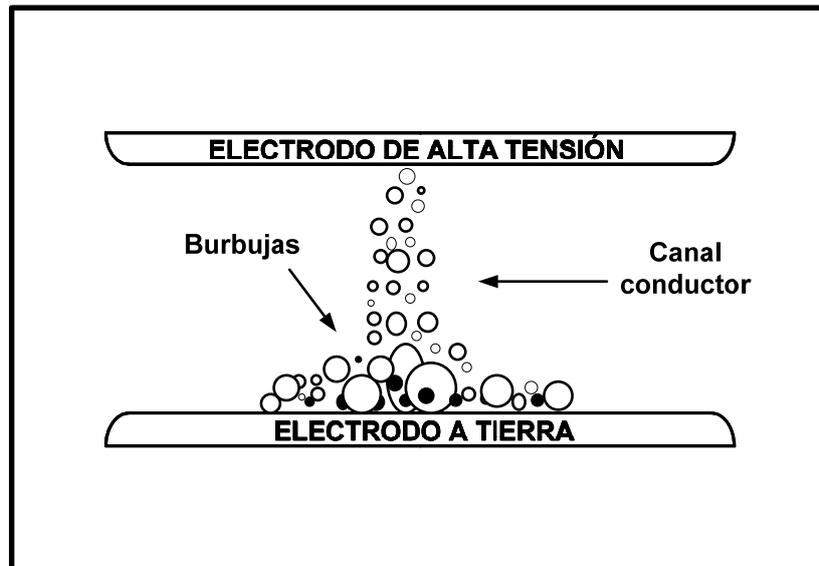
La ruptura térmica en los líquidos se puede describir de la siguiente manera: cuando la intensidad del campo eléctrico alcanza un valor determinado en una burbuja gaseosa, ésta se ioniza y la superficie líquida envolvente se calienta [20,21]. A determinada tensión, motivada por la variación del gradiente eléctrico, el líquido comienza a hervir, es decir, entra en proceso de ebullición, con lo cual la burbuja aumenta de tamaño, esto se muestra esquemáticamente en la figura 2.3. El gas ionizado va así incrementando su volumen hasta que ocurre la ruptura dieléctrica del medio [2,3].



*Figura 2.3 Ruptura térmica, proceso de ebullición en el electrodo a tierra.*

**2.2.2 Ruptura eléctrica**

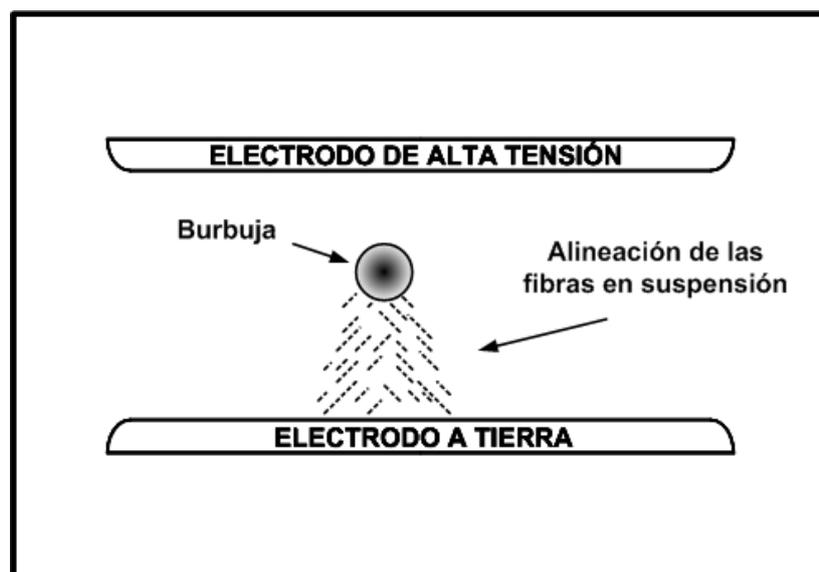
La ruptura eléctrica fue mencionada anteriormente y se puede resumir de la siguiente manera: partículas suspendidas en el medio, por ejemplo pequeñas burbujas de aire que son ionizadas y polarizadas formando un canal conductor. El campo eléctrico predominante polariza entonces estas gotas, las cuales se ordenan en el sentido de las líneas del campo formando así una cadena de conductancia elevada como se ilustra en la figura 2.4 [2,3,20,21].



*Figura 2.4 Ionización y polarización de pequeñas burbujas de aire, formando un canal conductor.*

### 2.2.3 Ruptura termofibrosa

En los líquidos no sólo se encuentran pequeñas burbujas, sino también fibras en suspensión, las cuales pueden ser el producto de otros materiales. Estas fibras crean entonces zonas de elevado gradiente eléctrico, con cuyos efectos se ordenan en el espacio interelectródico, formando un canal conductor. Este último conduce finalmente a la ruptura dieléctrica del medio. El canal conductor que se forma aumenta de temperatura debido al paso de la corriente. En la figura 2.4 se muestra este desarrollo [2,3,20,21].



*Figura 2.5 Ruptura de los líquidos, debido a fibras en suspensión.*

Una de las medidas preventivas que se usan con frecuencia en la práctica, consiste en interponer en el espacio interelectrónico pantallas aislantes, de manera que se evita la formación del referido canal conductor [20,21].

### **2.3 Propiedades de los materiales aislantes líquidos**

Los aislantes líquidos desempeñan en la técnica de la alta tensión un papel de extraordinaria importancia, comparable con el de los materiales sólidos, motivo por el cual se analizan brevemente sus propiedades más sobresalientes.

#### **2.3.1 Propiedades eléctricas**

**Conductividad eléctrica.** La conductividad eléctrica en corriente continua de los dieléctricos líquidos, es de naturaleza iónica y tiene alto coeficiente de temperatura (es decir, que cuanto más se eleva la temperatura más conductor se hace el material considerado).

El aumento de conductividad con la temperatura es el resultado de un aumento en la movilidad de los iones, que se produce por la disminución de la viscosidad. La conductividad de los líquidos puros puede ser incrementada por pequeñas cantidades de impurezas o de humedad, que se ionizan rápidamente en el líquido.

**Rigidez dieléctrica.** La perforación en líquidos puros se produce, por un proceso de ionización similar al de los gases. Los cambios de presión no ejercen prácticamente ningún efecto, pero el aumento de temperatura disminuye la resistencia a la perforación.

En los líquidos impuros, la perforación se produce con tensiones menores; la más importante de ellas es la presencia de fibras u otras partículas sólidas en suspensión, que absorben las impurezas, provocando "puentes" o "canales" si su constante dieléctrica es mayor que la del líquido.

El factor de potencia de la mayoría de aislantes líquidos no polares, está comprendido entre 0.0001 y 0.01. El factor de potencia a 60 Hz está influenciado por la conductividad eléctrica en corriente continua y su valor suele duplicarse cada 10 – 20 °C de elevación de la temperatura. En el campo de las altas frecuencias el factor de potencia de los dieléctricos no polares apenas varía con la temperatura.

### 2.3.2 Propiedades fisicoquímicas de los materiales aislantes líquidos

**Viscosidad.** Es la resistencia de los líquidos a fluir. La viscosidad es:

- Es proporcional a la superficie “S” de la lámina.
- Es proporcional a la velocidad de traslación “v”.
- Es inversamente proporcional al espesor “h” de la lámina.

$$Fv = u(S)\left(\frac{v}{h}\right) \quad (2.1)$$

donde:

F = fuerza de rozamiento.

S = superficie de la lamina.

v = velocidad de traslación.

h = espesor de la lamina.

u = coeficiente de viscosidad absoluta.

La unidad de viscosidad absoluta es el poise. ( 1 poise = (dina x seg.)/cm ). La viscosidad de los aislantes líquidos disminuye al elevar su temperatura y en muchos casos, resulta conveniente conocer esta variación cuando dichos líquidos han de trabajar a temperaturas relativamente elevadas.

### 2.3.3 Punto de flameo y de combustión

Se denomina punto de flameo de un líquido, a la temperatura mínima a la cual los vapores desprendidos por el líquido se inflaman en presencia de una llama. Punto de combustión es la temperatura a partir de la cual, el líquido arde ininterrumpidamente durante 5 segundos, por lo menos.

### **2.3.4 Punto de congelación y descongelación**

A bajas temperaturas, los aislantes líquidos se vuelven más viscosos. La primera anomalía que se observa al descender la temperatura, es la aparición de una especie de niebla en la masa del líquido; la temperatura a la que tiene lugar este fenómeno, se denomina punto de niebla. Si continuamos el descenso de la temperatura, llega un momento en que el líquido se solidifica (punto de congelación), o sea la temperatura en que la masa líquida se ha convertido en un cuerpo sólido. Cuando el líquido con masa sólida se vuelve a convertir en líquido a esa temperatura específica se denomina punto de descongelación.

**Oxidación y polimerización.** En presencia de oxígeno y bajo los efectos de temperaturas elevadas muchos materiales aislantes líquidos tienden a oxidarse, formando depósitos granulosos. Esta alteración es tanto más pronunciada cuando más elevada es la temperatura.

La oxidación de un aislante líquido se traduce en un aumento de viscosidad, de la temperatura de flameo de los vapores y del contenido de ácidos.

**El fenómeno de polimerización** o aglomeración de varias moléculas en una sola se presenta en algunos aislantes líquidos cuya composición química no es estable. Por efecto de esto, el aislante líquido se vuelve más viscoso y disminuye su poder refrigerante.

Los fenómenos de oxidación y de polimerización provocan, sobre todo, la formación de alquitrán y de asfalto, por lo que los materiales aislantes líquidos que pueden provocar la formación de estas sustancias, no son aptos para su empleo como dieléctricos ya que con ello quedan disminuidos su poder refrigerante y su rigidez dieléctrica. Los efectos de oxidación y de polimerización pueden ser provocados por la presencia de oxígeno, por las temperaturas elevadas de funcionamiento, por la acción de los arcos eléctricos y subsiguientes fenómenos de ionización y de formación de ozono, etc. Estos procesos progresan con el tiempo, provocando el envejecimiento de los materiales aislantes

líquidos que pierden, progresivamente, sus buenas cualidades físicas, químicas y eléctricas.

**Contenido de ácidos.** Los depósitos sólidos contenidos en los materiales aislantes líquidos producen diversos productos ácidos que tienen un efecto corrosivo sobre los metales y constituyen un peligro para los devanados y piezas metálicas, que pueden quedar destruidos por perforación rápida de los aislantes que a su vez se descomponen y disgregan.

**Materiales aislantes líquidos empleados en electrotecnia.** Para la utilización de materiales líquidos como dieléctrico, es necesario que tenga buena estabilidad química, de forma permanente. Los materiales líquidos que reúnen buenas cualidades dieléctricas y buena estabilidad química son, casi todos, aceites vegetales y minerales, convenientemente tratados, que reciben el nombre general de **aceites aislantes**. Además se emplean otros materiales sintéticos, como hidrocarburos clorados y las siliconas líquidas; finalmente, algunos productos como el tetracloruro de carbono y el **agua pura**.

### **2.4 El agua como aislamiento eléctrico**

Hay un interés considerable en el estudio de la ruptura eléctrica en agua (y otros líquidos) por una variedad de razones. Debido a que cuenta con una fuerza de ruptura eléctrica alta ( $\sim 100$  MV/m) [22], cuando se usa un pulso de voltaje, una habilidad de auto recuperación, una constante dieléctrica alta ( $\epsilon = 81$ ) y un rápido proceso de ruptura eléctrica [23]. Estas propiedades hacen que el agua sea un buen candidato para el almacenamiento de energía, el aislamiento de dispositivos de alta tensión, diseño de equipo acústico con gap llenos de agua y elementos de conmutación en sistemas de potencia pulsada [22,25,26].

Recientemente, se ha propuesto la aplicación de las descargas eléctricas en el agua para realizar su purificación química y biológica. Diversas especies activas pueden ser formadas durante la propagación de streamers y esto puede jugar un papel importante para la eliminación de bacterias o para la degradación de compuestos orgánicos [5,6].

El agua común no es un líquido aislante y no puede soportar campos eléctricos intensos en tensión directa o alterna; su conductividad eléctrica  $\sigma_w$  es de al menos  $0.054 \mu\text{S}/\text{cm}$  para el agua teóricamente pura y mucho más elevada (varias centenas de  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en presencia de sales disueltas [5,6].

### **2.5 Teoría de la ruptura en agua**

Hay dos tipos de modelos básicos que describen el mecanismo de la ruptura en agua:

- ❖ Modelos de ruptura en microsegundos.
- ❖ Modelos de ruptura en sub – microsegundos.

#### **2.5.1 Modelos de ruptura en microsegundos**

Aunque se han usado modelos electrónicos para describir la ruptura en el tiempo de microsegundos, modelos recientes se basan en la dinámica de las burbujas. En estos modelos, una burbuja es formada por una temperatura elevada debido a un flujo pesado de corrientes de prerruptura iónicas (en soluciones de sal) o debida a la temperatura local, como un resultado de las corrientes de la emisión del campo en asperezas microscópicas en el cátodo o debido a cavidades. A continuación se describen criterios de las diferentes rupturas, según la física para el desarrollo de la descarga [27,28,29].

#### **2.5.2 Modelos de ruptura en sub-microsegundos**

Hay dos tipos de modelos básicos que describen el mecanismo de ruptura en agua en un tiempo de sub-microsegundos: las teorías electrónicas y térmicas. En el modelo electrónico, se asume que el proceso es puramente electrónico y una avalancha de electrones se forma en la fase líquida. Los modelos térmicos (por microsegundos y sub-microsegundos, involucran una burbuja en el proceso dinámico en el que una avalancha de electrones se desarrolla en la fase de vapor seguida de la formación de una burbuja o una burbuja pre-existente).

**2.5.2.1 Modelos electrónicos**

Durante varios años, varios grupos de investigadores han indicado la similitud en la prerruptura y han tratado de aplicar conceptos tomados de la teoría de la descarga en gas para líquidos, tal como el streamer y la avalancha de electrones para el modelo de la ruptura dieléctrica en agua. Se ha considerado como uno de los procesos fundamentales de ionizaciones el impacto del electrón en la fase líquida la cual causa el incremento en la corriente asociado con la ruptura. Algunos modelos de ruptura están basados en este proceso, sobre todo aplicable en una escala de tiempo de sub-microsegundos, que sigue estrechamente a modelos similares por ruptura en gases; en particular, el modelo del streamer. Se ha sugerido que una avalancha de electrones puede crecer en el agua ó en otros líquidos bajo la influencia de campos eléctricos altos y la ruptura sigue la avalancha para la transición del streamer [30,31]. El modelo se basa en un mecanismo no-térmico por formación y propagación de leaders en la descarga en agua en nanosegundos. En este modelo los “leaders” se desarrollan como ondas de ionización.

La mayoría de los modelos electrónicos asumen la pre-existencia de un electrón libre. Con esta suposición, el electrón puede ser acelerado por el volumen del campo, ganando suficiente energía para ionizar una molécula del agua. Este proceso es repetido, produciendo una avalancha de electrones. El conocimiento con respecto al campo bajo las propiedades eléctricas del agua no sostiene este punto de vista [32]. En primer lugar, no hay electrones libres; cualquier electrón se combinará químicamente con algunas impurezas cargadas positivamente, dentro de microsegundos.

La única fuente para éstos electrones libres es del cátodo, pero estos electrones también se combina rápidamente. De este modo, el mecanismo del streamer fase-gas, no puede ser aplicado directamente a la ruptura en agua ya que la ionización del impacto del electrón y foto-ionización son insignificantes en campos de ruptura [32]. También, según el análisis llevado a cabo por Jones y Kunhardt [33], el coeficiente de ionización,  $\alpha$  ( $\alpha = v_i/v_d$ , donde  $v_i$  es la velocidad total ionización y  $v_d$  es la velocidad de desplazamiento).

### **2.5.2.2 Teoría térmica**

En la "versión térmica", la avalancha es iniciada debido a una burbuja pre-existente ó en burbujas que se forman por un calentamiento de un flujo pesado de corrientes de la prerruptura iónicas en soluciones de sal o calentamiento local por corrientes de la emisión del campo del líquido. El calentamiento local ocurre cerca de asperezas microscópicas en los electrodos, donde el campo y la densidad son muy grandes. Como se describió en sección 2.5.1, hay varios modelos basados en la versión térmica del mecanismo de la burbuja, que apuntan a describir la ruptura en el tiempo de microsegundos [34].

El mecanismo de la burbuja es demasiado lento para considerarse por ruptura en sub-microsegundo. La velocidad de propagación,  $v_f$ , del canal desarrollado en agua, medido por métodos ópticos se han encontrado ser tan alto como  $10^7$  cm/s [34]. De este modo, la expansión hidrodinámica simple de una burbuja es insuficiente para describir la propagación del canal en las descargas de sub-microsegundos. Sin embargo, la avalancha de electrones en la fase líquida tiene que ser mostrada como la ausencia de campos eléctricos.

Por consiguiente, una burbuja en la que estas avalanchas pueden desarrollarse separa la iniciación del proceso de pre-ruptura. También, de acuerdo a una descripción razonable, el proceso electrónico es improbable que proceda en el líquido del agua y el coeficiente de ionización es cerca del cero ( $\alpha \cong 0$  a los campos de ruptura), el crecimiento de la corriente de prerruptura, es probable proceder vía avalancha electrónica en regiones de baja densidad ó burbujas en el líquido por el que,  $\alpha \neq 0$  [33,35].

El término "región de baja densidad" aplica para presiones sobre la presión crítica por el que no hay ninguna transición de la fase. Por consiguiente, el término "burbuja" se usa generalmente para referirse a esta región. Existen numerosas observaciones experimentales que llevan a esta expresión:

- 1) La rigidez dieléctrica de los líquidos disminuye a temperaturas crecientes igual a la del margen del cambio de densidad debido al incremento de la temperatura.
- 2) Se observan burbujas de puntas afiladas en los electrodos dentro de unos pocos microsegundos.
- 3) La fuerza de la ruptura en líquidos aparece aumentar con presiones crecientes [33,35].

Klimkin [36], mostró ópticamente, usando una cámara de gran velocidad (10 ns entre cuadros subsecuentes) que la generación de una descarga eléctrica en agua en el rango de sub-microsegundos (por retraso del tiempo a ruptura de 90 ns) se presenta de la generación de micro-burbujas y su expansión hidrodinámica alrededor de la punta del electrodo [36].

### **2.5.2.3 Teoría de Jones y Kunhardt**

La teoría más importante relacionada al modelo térmico se basa de los experimentos de Jones y Kunhardt [33,35,38], conducidos a voltajes altos (80 kV) y la duración de pulsos muy cortos (100 ns). Sus resultados indicaron que portadores de las cargas iónicas no tienen ningún efecto en el proceso de ruptura y la descarga es iniciada en pequeñas micro-burbujas. Las descargas experimentales se iniciaron bajo centenas de atmósferas de presión y el campo eléctrico de centenas de kV/cm, dando por resultado un retraso a la ruptura del orden de decenas de nano-segundos [37].

Jones y Kunhardt, argumentaron que inicialmente se asume una burbuja en el líquido cerca de una aspereza en el cátodo y su densidad disminuye con tiempo debido a que el calentamiento continúa por corrientes de la emisión del campo. Para los campos uniformes consideraron que hay una gran probabilidad de ruptura desarrollada en el cátodo a causa de las corrientes de la emisión del campo. También mostraron que para toda condición experimental, corrientes iónicas en el volumen no juegan ningún papel en la formación de una burbuja en el tiempo de sub-microsegundos. Así, corrientes de la emisión del campo de asperezas (que puede proporcionar el calentamiento necesario y

los electrones libres) emergen como el agente más probable que contribuye con la nucleación. Por una emisión del campo típica de corriente de aproximadamente  $9 \times 10^{-7}$  A (consistente con corrientes de la emisión del campo encontradas en otros líquidos, por la consideración del campo), de radios de punta  $r_t$  de aproximadamente 20  $\mu\text{m}$  (con una densidad de corriente  $j \approx 7 \times 10^2$  A/cm<sup>2</sup>), la densidad de potencia es  $\approx 3 \times 10^{11}$  W/cm<sup>3</sup> por  $V_g/d = 600$  kV/cm y un mejoramiento del campo en un factor de 700. Esta entrada de potencia es suficiente para generar una burbuja bajo condiciones de pulso de sub-microsegundos.

La densidad de electrones  $n$  al sitio de la nucleación disminuye debido a la expansión causada por el calentamiento continuo. La región de nucleación se extiende en la dirección axial hacia el ánodo debido al aumento de la acción de la presión electrostática dentro de la región con una constante dieléctrica menor. La ionización de impacto de electrones de moléculas del agua pueden producirse cuando se ha reducido la densidad del electrón y ha alargado un valor crítico de  $N_c$ . Esto ocurre por la densidad de electrones  $n \leq N_c$  (electrones son localizados en agua a densidades  $> N_c$ ). Para agua  $N_c$  es  $10^{20}$  cm<sup>-3</sup> [39]. El coeficiente de ionización  $\alpha$ , por vapor del agua se da por:

$$\frac{\alpha}{p} = 12.9e^{-\frac{289p}{E}} \quad (2.2)$$

donde  $p$  es la presión en mmHg y  $E$  está en V/cm. La ecuación anterior es válida para  $p/E$  con valores en el rango de  $150 \leq p/E \leq 1000$ . Donde  $p/E$  en la región de baja densidad en la que  $n \leq N_c$  cae dentro de este rango, la ecuación 2.2 propaga el crecimiento de la densidad del electrón [40]. Este crecimiento es exponencial hasta que el campo de carga del espacio  $E_{sc}$ , se vuelve del orden de  $E$ . El campo total ( $E + E_{sc}$ ) dentro de la región de ionización disminuye al límite de la región por eso retarda el crecimiento global a pesar de reforzar el crecimiento local al límite. El crecimiento de la avalancha se retarda cuando la carga del espacio generada por campos, está sobre el orden de campos externos.

Los electrones en campos expandidos delante de la avalancha son inyectados continuamente en el lado del líquido de la interfase, teniendo un calentamiento local en el líquido, por ello disminuye su densidad. El avance de la ionización como nueva avalancha de electrones crece en esta región cuando la densidad decrece debajo de  $N_c$ . Nuevas avalanchas pueden formarse subsecuentemente en esta región. La entrada de potencia al líquido por los electrones al frente depende de la resistencia del canal de ionización. La resistencia de este canal debe ser suficientemente baja para permitir que la energía fluya del electrodo caliente al líquido [33,35,38].

Resumiendo, tres condiciones deben encontrarse para la ruptura:

- 1) La formación de una región en el líquido con  $n \leq N_c$ .
- 2) La magnitud espacial de esta región debe ser más grande que la distancia requerida para una avalancha para volverse crítica.
- 3) La conductibilidad del canal al frente de la ionización, debe ser suficientemente alta para mantener el flujo de energía requerido para calentar el líquido al frente con su densidad debajo de  $N_c$ .

### **2.6 La ruptura de líquidos comerciales**

Cuándo una diferencia de potencial es aplicada a un par de electrodos sumergidos en un líquido aislante, una corriente pequeña de conducción es observada primeramente. Si el voltaje es elevado continuamente, entonces en un voltaje crítico una chispa pasa entre los electrodos. El paso de una chispa por un líquido implica lo siguiente [3,4]:

- a) El flujo de una cantidad relativamente grande de electricidad, determinado por las características del circuito.
- b) Un sendero luminoso brillante de electrodo a electrodo.
- c) La evolución de burbujas de gas y la formación de productos sólidos de la descomposición (si el líquido es de naturaleza química).
- d) La formación de pequeños hoyos en los electrodos.

- e) Una presión impulsiva a través del líquido acompañado con un sonido explosivo.

En las pruebas en aceite del transformador altamente purificado se observa lo siguiente:

- a) La fuerza de la ruptura tiene una dependencia pequeña pero definida del material del electrodo.
- b) La fuerza de la ruptura disminuye con el aumento en el espacio interelectrónico.
- c) La fuerza de la ruptura es independiente de la presión hidrostática para el aceite, pero aumenta la presión si el aceite contiene gases como nitrógeno u oxígeno en la solución.

En el caso de líquidos aislantes comerciales, los cuales no pueden ser sujetos a tratamientos de purificación muy elaborados, la fuerza de ruptura dependerá más de la naturaleza de las impurezas contenidas, que de la naturaleza del líquido mismo. Estas impurezas que llevan a la ruptura de líquidos comerciales debajo de su fuerza intrínseca, pueden ser divididas en las siguientes tres categorías [3,4,41]:

- a) Las impurezas que tienen una rigidez dieléctrica más baja que el líquido mismo (las burbujas de gas). La ruptura de las impurezas puede desencadenar en la ruptura total del líquido.
- b) Las impurezas que son inestables en el campo eléctrico (glóbulos de agua). La inestabilidad de la impureza puede tener como resultado un puente bajo, de la resistencia a través de los electrodos y en la ruptura total.
- c) Las impurezas que tienen como resultado el aumento local del campo eléctrico en un líquido (conducción de partículas). El aumento del campo puede causar la ruptura local y por lo tanto inicia la ruptura completa.

# **CAPITULO III**

## **MECANISMO DE LA GENERACIÓN DE BURBUJAS**

### **3.1 Introducción**

Las burbujas en un líquido, su movimiento y las oscilaciones son fáciles de imaginar. No obstante, como un sistema de dos fases con fronteras libres, constituye un tema notoriamente difícil de estudiar científicamente debido a su dinámica implicada en una escala de tiempo muy corta [42].

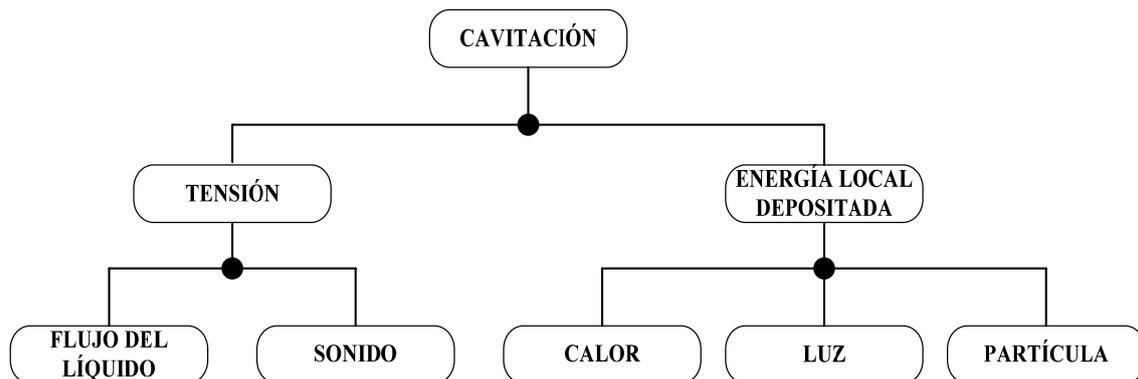
En experimentos prácticos de aplicaciones así como en laboratorio, sistemas de multiburbuja prevalecen. De hecho, ha sido el foco de investigación de la cavitación por muchas décadas. En la cavitación de multiburbujas la influencia del ambiente es decir, la interacción de burbujas con el campo aplicado del sonido, con obstáculos o fronteras y con la interacción mutua de burbujas, se da una situación muy complicada repleta de física interesante: en particular, el sonido y la emisión de luz; el flujo libre en la frontera con las oscilaciones, ondas de choque, las reacciones químicas y formación de la estructura en el campo de la burbuja [42,43].

Para lograr una mejor comprensión de sistemas complejos compuestos de unidades elementales, es necesario estudiar estas unidades con todo detalle. Esta base científica se ha probado exitosamente en varias circunstancias. La cavitación se tiene que mirar completamente en una sola burbuja aislada y su interacción con el ambiente en una colocación controlada. Una manera de hacer esto es por medio de trampas de burbujas [43].

Esto ha llegado a popularizarse recientemente por el descubrimiento del fenómeno notable de la sonoluminiscencia de una sola burbuja (SBSL), que dio un nuevo empuje a la física de la cavitación y en particular, a la exploración de sonoluminiscencia. Un segundo método complementario de la investigación de una sola burbuja es proporcionado por la cavitación óptica es decir, la generación de cavidades transitorias

en líquidos por pulsos fuertes de láser. La luminiscencia de la burbuja es observada también en la cavitación óptica y así es esperado que las burbujas lleguen a ser cada vez más populares para la investigación de este fenómeno.

La cavitación puede ser iniciada por una tensión eléctrica en el líquido ó depositando una energía local como se muestra en la figura 3.1 [42,43,44].



*Figura 3.1 Clasificación de los diferentes tipos de cavitación.*

El proceso físico de la cavitación es casi exactamente igual que el que ocurre durante la ebullición. La mayor diferencia entre ambos consiste en cómo se efectúa el cambio de fase. La ebullición eleva la presión de vapor del líquido por encima de la presión ambiente local para producir el cambio a fase gaseosa, mientras que la cavitación es causada por una caída de la presión local por debajo de la presión de vapor. Para que la cavitación se produzca, las "burbujas" necesitan una superficie donde nuclearse.

Esta superficie puede ser la pared de un contenedor o depósito, impurezas del líquido o cualquier otra irregularidad. El factor más determinante en cómo se produce la cavitación es la temperatura del líquido. Al variar la temperatura del líquido varía también la presión de vapor de forma importante, haciendo más fácil o difícil que para una presión local ambiente dada la presión de vapor caiga a un valor que provoque cavitación [42,43,44].

### **3.2 Tipos de generación de burbujas**

La generación de una burbuja se puede realizar por varios procesos, tales como impulsos acústicos, materiales químicos explosivos, una chispa eléctrica e inclusive el uso de un láser. La burbuja generada por una chispa eléctrica [9,45], se forma como resultado de la aplicación de un voltaje a través del gap del líquido. La burbuja generada por un láser, se produce por el rayo del láser enfocado en una región en el líquido, la energía del rayo del láser emite una energía causando la ruptura o vapores en el líquido.

La generación de burbujas por impulsos acústicos [43,46], se generan como resultado de la aplicación del ultrasonido al dieléctrico líquido. Estas burbujas son micro-burbujas [42], en comparación con las burbujas generadas por una chispa que podrían tener un diámetro en centímetros [45], y las burbujas generadas por el láser pueden tener diámetros en milímetros [44,45].

#### **3.2.1 Generación de la burbuja por ignición (chispa eléctrica)**

La chispa eléctrica bajo el agua es un proceso por medio del cual la energía eléctrica se convierte en un plasma de volumen pequeño, con temperaturas en el plasma cercanas a 20000 °K y una presión dentro de la burbuja generada de algunos miles de atmósferas. Como el pulso de disparo que rompe en el gap de apagado sostenido entre los electrodos, en el cual fluye una corriente entre los electrodos, con una energía absorbida en el plasma y con un índice dependiente de la entrada de la potencia y la inercia del agua [9,45].

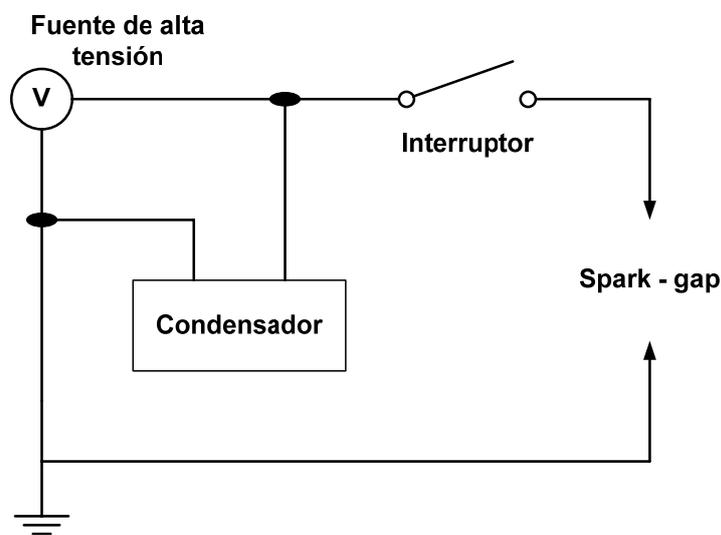
La energía en el plasma se disipa en forma de disociación, excitación, ionización y energía cinética de las partículas constitutivas. Debido a la disminución en el voltaje y un incremento en la ionización, temperatura y presión del plasma, se extingue la chispa [9].

Mientras la presión y la temperatura del plasma tienden a expandirse, la inercia fuera de agua tiende a confinarlo. El trabajo mecánico, radiación de luz, radiación térmica y conducción térmica disipan la energía del plasma a una velocidad más lenta que la

entrada de la energía de la chispa. Debido a la presión alta, la interacción del líquido cerca del plasma se comprime inicialmente. Esta presión alta lleva a la formación de una onda de choque que sale al exterior.

La energía de las ondas de choque comprende de 20 a 50 por ciento de la energía impartida por la chispa en el agua. Después de la emisión de las ondas de choque, la presión en la esfera del gas rápidamente disminuye, pero algunos restos quedan sobre el líquido envolvente. La presión del gas expande y alarga la burbuja, que a continuación se re-expande y colapsa. La burbuja generada por la chispa desenvuelve una serie de reducciones y expansiones de hasta diez veces [45,48].

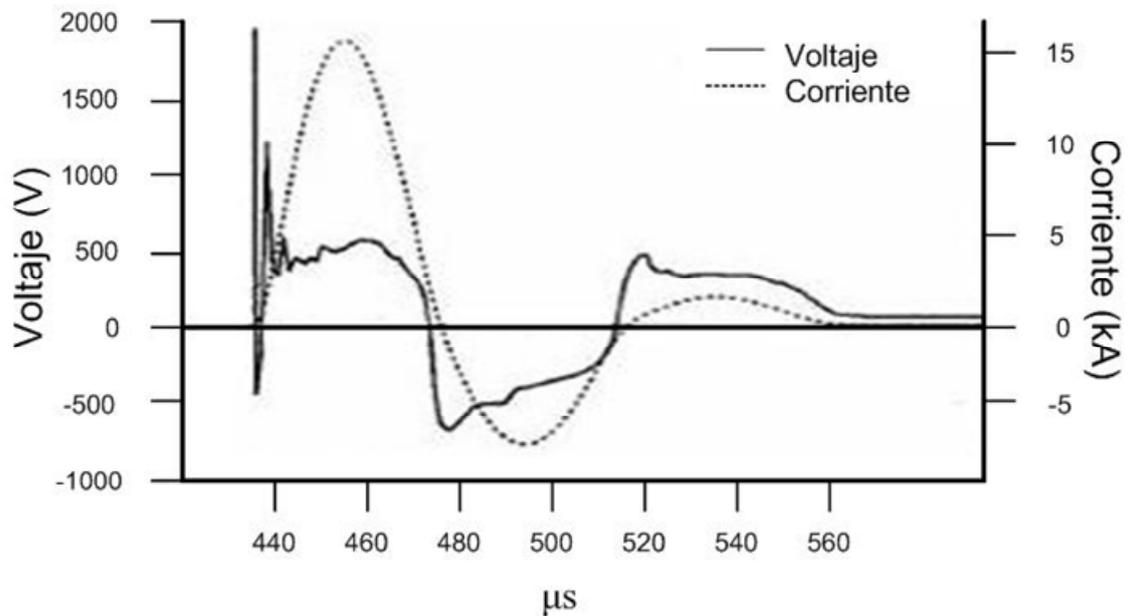
En la figura 3.2 se muestra un diagrama muy simple de un sistema de descarga por chispa típico. Se usa una fuente de alto voltaje para cargar un condensador que se aísla de los electrodos. Después de que el condensador es cargado, un interruptor es cerrado y un voltaje aparece a través del gap de los electrodos que están bajo el agua [49].



**Figura 3.2** Sistema típico de la descarga del spark-gap [49].

El dieléctrico en el gap (agua), se descompone después de un periodo de tiempo, llamado ruptura cronométrica y se forma un arco. Las características eléctricas medidas (voltaje y corriente), de una descarga típica pequeña se muestran en la figura 3.3. Fotografías en la literatura muestran que el plasma llena la burbuja en las diferentes

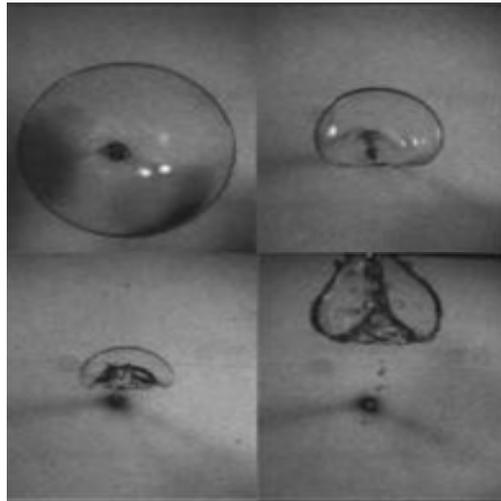
fases de la dinámica de la misma, en su centro y se observa como se expande y colapsa [49].



**Figura 3.3** Medición típica de voltaje y corriente de una ruptura cronométrica [49].

Se han usado generadores de chispa para el estudio de las burbujas en un líquido por largo tiempo. El uso de cámaras de alta velocidad para fotografiar la burbuja producida por la chispa eléctrica, se utilizan con el objetivo de observar su dinámica con una visualización clara de la formación y reacción del plasma dentro de ella como se muestra e la figura 3.4. Uno de los primeros problemas no resueltos en el estudio de la explosión de la dinámica de la burbuja son la dilucidación clara de los fenómenos de la hidrodinámica. Tales observaciones pueden ser sumamente útiles en el desarrollo y validación de modelos numéricos [9,48,49].

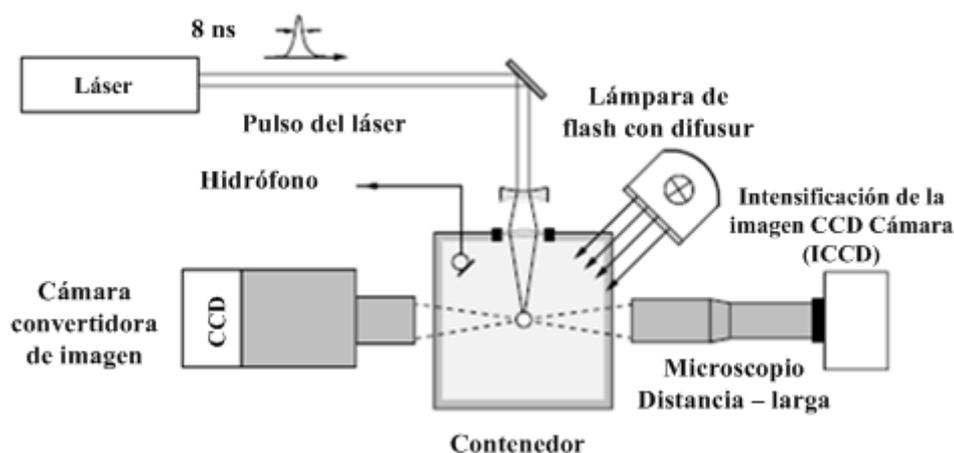
Buogo, Chahine y Xin-Pie [9,45,53], investigaron la generación de la burbuja por una chispa eléctrica. Chahine examinó la burbuja generada por la chispa, por modelado de explosiones bajo el agua. Buogo estudio el crecimiento, colapso y rebote de una burbuja de vapor generada por un chispa bajo el agua. Estas investigaciones se realizaron usando un banco de capacitores con una capacitancia total de 360  $\mu\text{F}$  y dos electrodos de tungsteno con puntas hemisféricas. Se cargaron los condensadores a 2.35 kV y la energía electrostática máxima de 1 kJ.



**Figura 3.4** Dinámica de la burbuja causada por una chispa eléctrica. El punto negro en el centro de la burbuja es debido al plasma producido por la chispa [9].

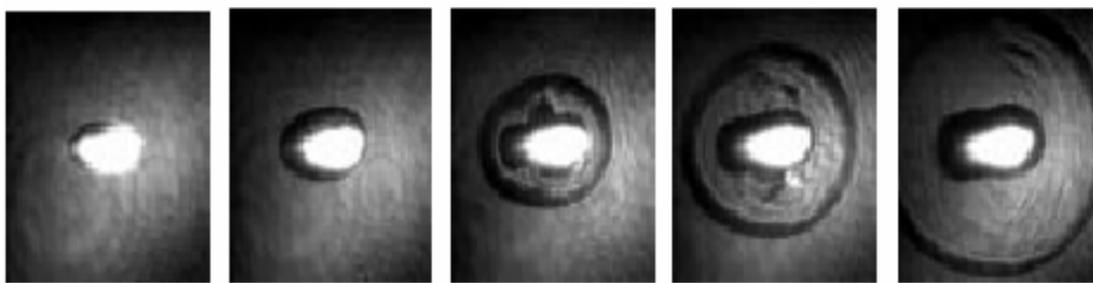
### 3.2.2 Generación de la burbuja por Láser

La cavitación óptica proporciona medios convenientes de producir una sola burbuja en un líquido transparente. Para ese propósito, un pulso corto del láser es enfocado en el líquido. La figura 3.5, representa un arreglo experimental para observar la burbuja y sus ondas de choque por medio de fotografía de alta velocidad. Las ondas de choque son controladas también por un hidrófono rápido. Casi cualquier láser, que pueda emitir pulsos cortos con duraciones del orden de unos pocos nano-segundos o menos y energías por pulso de unos pocos mili-joules, pueden ser utilizados [42,50,51].



**Figura 3.5** Arreglo experimental típico con cavidad óptica, con fotografía de alta velocidad. Para la fotografía de ondas de choque, se quita el difusor y se escoge una pequeña abertura del objetivo de cámara [42].

Los pulsos del rayo láser son enfocados por lentes para evitar el múltiplo y los sitios espacialmente prolongados de ruptura. En la región focal, una intensidad ligera muy alta, asociada con una fuerza grande en el campo eléctrico, es lograda. En esta región, el pulso del láser causa la calefacción de impurezas y/o ruptura dieléctrica con ionización de avalancha y crea un lugar del plasma. El plasma se expande para formar la cavidad. En la figura 3.6, se muestra un ejemplo de la generación de la burbuja por un pulso de láser y la emisión asociada con ondas de choque. La dinámica de la burbuja es demasiado rápida y su colapso sólo puede capturarse con cámaras de alta velocidad ó iluminación corta [42,50,51].



**Figura 3.6** Generación de la burbuja y emisión de las ondas de choque de la ruptura, causado por un pulso de láser en agua. Con un retraso de tiempo entre el pulso generado y la iluminación del pulso aplicado: 9.5 ns, 13 ns, 69 ns, 107 ns y 157 ns. [42].

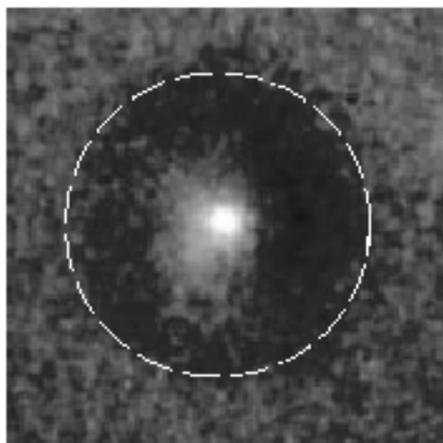
Larsson [47], publico también la generación de una burbuja de la cavidad como resultado del enfoque de un rayo láser en el aceite de transformadores. Se utilizo un láser de Q-switched, que entregó pulsos con una duración de 10 ns en una longitud de onda de 1064 nm. El pulso enfocado del láser crea un plasma en el líquido dieléctrico. Si la energía del pulso del láser es cercana al umbral de la ruptura, se genera una mancha de plasma. La vida del plasma es menos de 100 ns. Produciendo un gas de alta presión en la cavidad. La presión alta expande la cavidad hasta un radio máximo, que fue de 1.4 mm en  $\sim 150 \mu\text{s}$  en los experimentos que llevó a cabo Larsson. Finalmente se contrae y colapsa. El período del colapso fue semejante al período de expansión [47,52]. Según un modelo matemático del movimiento de una burbuja esférica generada por el láser propuesto por Akhatov [44], la presión y temperatura máxima dentro de la burbuja alcanza  $10^5$  bar y  $10^4$  °K respectivamente, semejante en magnitud a las temperaturas indicada por Xin-Pie para la burbuja generada por una chispa [53].

### **3.3 Fenómenos asociados con la generación de las burbujas**

Se han reportado algunos fenómenos que acompañan la generación de la burbuja tales como: emisión de luz y ondas de choque generadas en el colapso de la burbuja, por lo que es apropiado discutir estos, fenómenos.

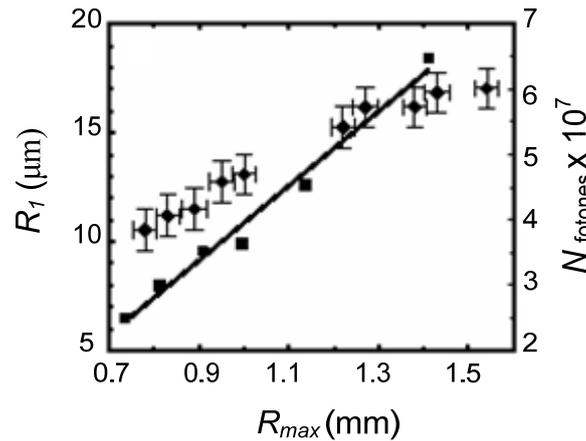
#### **3.3.1 Emisiones de Luz**

Un modelo ampliamente aceptado para la emisión de luz es la concentración de energía por ondas de choque que convergen en el interior, enfocando en el centro geométrico de la burbuja. La emisión de luz es causada por la entrada de energía del pulso que genera. En la figura 3.7, se muestra una imagen de la luminiscencia, que ocurre durante el colapso de la burbuja esférica, tomada con una cámara ICCD (Intensidad CCD) con un tiempo de la exposición de 5  $\mu$ s. La mancha luminosa mostrada en la figura 3.7, está en el centro del contorno de la burbuja [42].



***Figura 3.7** Emisión de luz de una burbuja generada por láser en primeros colapsos, (sobrepuesto en la imagen es un contorno del tamaño máximo de la burbuja antes del colapso) [42].*

Midiendo el tamaño de la mancha, integrando la luz completa sobre el área de la mancha y determinando el radio máximo, se muestra la grafica obtenida en la figura 3.8. Esto da la dependencia del radio de la región luminosa dentro de la burbuja ( $R_l$ ) y el número de fotones emitidos ( $N$ ), en el radio máximo alcanzado por la burbuja  $R_{\max}$  [42].

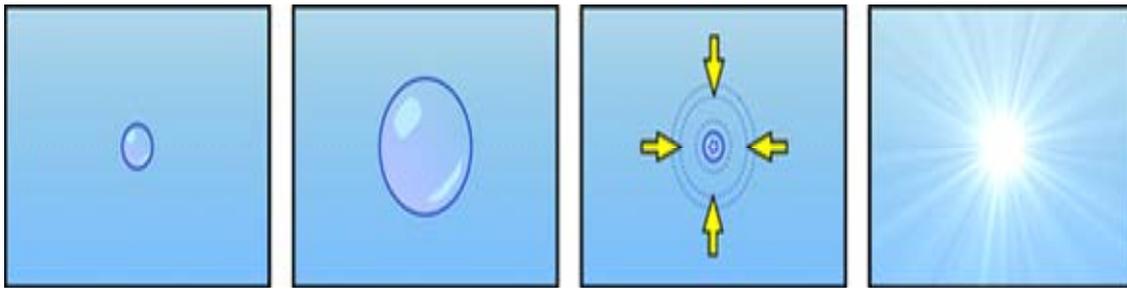


**Figura 3.8** Radio  $R_l$  de la emisión de la mancha (diamantes) y número  $N$  de fotones emitidos (cuadrados) como una función del radio máximo de la burbuja [42].

La figura demuestra claramente que el tamaño máximo de la burbuja está en fuerte correlación con el rendimiento de la luz. Obviamente, el radio más grande alcanzado por la burbuja  $R_{max}$  es en el colapso y más luz es emitida iluminando un volumen más grande. Las emisiones de luz, también han sido reportadas con burbujas de ultrasonido. La entrada primaria de la energía en este caso es sonido y el fenómeno se llama sonoluminiscencia [42].

La sonoluminiscencia puede o no ocurrir siempre que una onda sonora de intensidad suficiente induzca una cavidad gaseosa dentro de un líquido a una contracción rápida. Esta cavidad puede tomar la forma de una burbuja pre-existente, o puede generarse a través de un proceso conocido como cavitación. La sonoluminiscencia en el laboratorio puede hacerse estable, para que una sola burbuja se expanda y contraiga repitiéndose una y otra vez en un modo periódico, emitiendo un estallido de luz cada vez que colapsa [42,43].

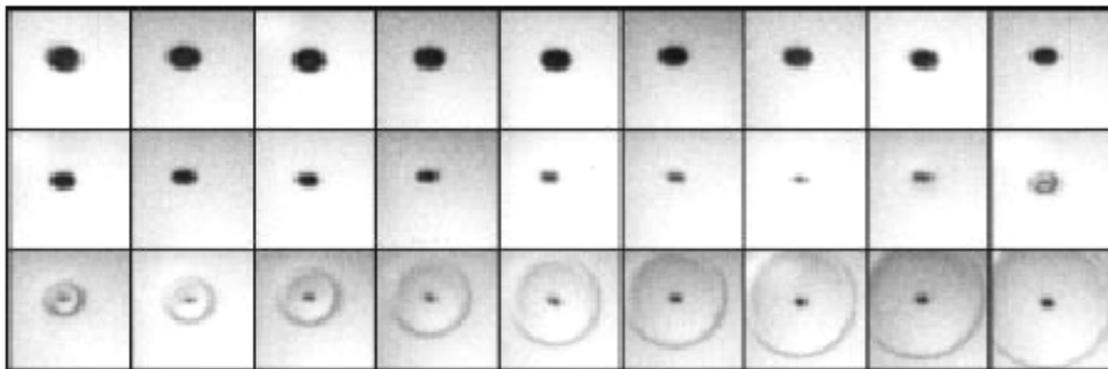
Para que esto ocurra, una onda acústica es ubicada dentro de un líquido y la burbuja se ubica a un anti-nodo de presión en la onda estacionaria. Las frecuencias de resonancia dependen de la forma y tamaño del recipiente en que la burbuja se contiene. Los pequeños destellos de las burbujas son sumamente cortos, entre unos 35 y unos cientos de microsegundos, con intensidades máximas del orden de 1-10 mW. Las burbujas son muy pequeñas cuando se emite el resplandor, cerca de 1 micrómetro de diámetro que depende del fluido ambiente (por ejemplo el agua) y el gas de la burbuja (por ejemplo el aire atmosférico), figura 3.9 [43].



**Figura 3.9** Esquema del fenómeno de sonoluminiscencia. De izquierda a derecha: aparición de una burbuja, expansión lenta, contracción rápida y emisión de luz [43].

### 3.3.2 Ondas generadas en el colapso de la burbuja

En la figura 3.10, se presenta un ejemplo de una secuencia fotográfica de alta velocidad que muestra las etapas finales del colapso de la burbuja. Esta serie fue tomada en marcos por segundo con una cámara de convertidor de imagen en investigaciones realizadas experimentalmente [42]. Se muestra también, una burbuja esférica libre producida en el agua que es mostrada para experimentar un primer colapso rápido y en este proceso, irradia una onda de choque esféricamente simétrica. La serie empieza después de que la burbuja ha alcanzado su radio máximo [42].



**Figura 3.10** Una simetría esférica de las ondas de choque emitidas por una burbuja generada por un láser en los primeros colapsos tomada a 20.8 millones de cuadros por segundo [42].

La burbuja es vista como un disco oscuro porque la retro iluminación es desviada por la pared de la burbuja. Del punto de la expansión máxima, la burbuja comienza a contraerse, ganando velocidad en una tasa creciente, manejada por la presión del ambiente y llevando a un colapso con una compresión fuerte del contenido de la burbuja

(gas y vapor) en la fase final. La presión dentro de la burbuja se incrementa notablemente, con el contenido de gas que actúa como un 'resorte duro', parando bruscamente el movimiento y manejo interno de la burbuja en la expansión, llamado rebote. Como es claramente visible en la figura 3.10, en la fase seguida de una compresión máxima, una onda de choque que es emitida al exterior. La onda de choque se propaga aproximadamente a la velocidad del sonido es decir, alrededor de 1500 m/s en el agua [9,42,54].

### **3.4 Teoría de la dinámica de la burbuja esférica**

La dependencia de la ruptura sobre la presión en el aislante líquido llevó a investigadores a sospechar que burbujas gaseosas juegan un papel importante en el disparo de la ruptura. Esto ha sido confirmado por trabajos [55,56] que mostraron que una presión moderada (hasta unos MPa) puede suprimir la iniciación de la burbuja en un electrodo al aumento del voltaje inicial de la descarga y por consiguiente el aumento de la fuerza dieléctrica del líquido. Tal presión (MPa) no puede alterar las estructuras microscópicas del líquido y por consiguiente no puede verificar el desarrollo de la avalancha en la fase líquida.

El análisis de la dinámica de la burbuja es muy importante no sólo para entender el fenómeno de la prerruptura y ruptura en el aislante, también por otras razones. La conducta de la burbuja depende de las tensiones a las que se somete la burbuja. En otras palabras, la expansión e implosión de una burbuja, depende del tipo de límites (límites rígidos, superficies libres, etc) [57].

Generalmente el desarrollo del streamer en líquidos dieléctricos es precedido por una burbuja gaseosa, resultando un calentamiento local del líquido inducido por una inyección de pulso de corriente [56]. La generación, crecimiento y colapso de una burbuja esférica han sido sujetos a numerosos trabajos [58,59]. Se ha mostrado que la condición de generación de la burbuja y sus dimensiones dependen del voltaje aplicado, la geometría del electrodo y las propiedades fisicoquímicas del líquido. Dependiendo de la inestabilidad de la interfase de esta burbuja y el líquido circundante, se pueden comenzar modelos del streamer diferentes [60,61].

Se han dedicado numerosos estudios a la deformación e inestabilidad de una burbuja inmersa en volumen de un medio líquido sometida a un campo eléctrico uniforme. Según algunos autores, cuando se aumenta el voltaje aplicado, la burbuja gaseosa se alarga simétricamente, en forma de un esferoide en la dirección del campo. La inestabilidad de la burbuja ha sido analizada en función de la conductibilidad, su radio inicial y permitividad con respecto al gap electródico y la permitividad del medio líquido, respectivamente [62,63].

Garton y Krasucki [62] demostraron que cuando la longitud de la burbuja alargada alcanza dos terceras partes del gap electródico, el canal de ruptura se desarrolla al final de la burbuja. La propagación del canal da por resultado la ruptura total. Beroual mostró que el estado crítico de la burbuja también depende de la concentración y las dimensiones de las burbujas presentes en el volumen. En cambio, la deformación de la burbuja puede ser asimétrica, depende de su posición con respecto al electrodo y la densidad de carga de la superficie [63, 64].

La dinámica de la explosión de las burbujas bajo el agua, es considerada en condiciones de campos libres; esto es, cuando la burbuja y su dinámica subsiguiente poseen la simetría esférica y cuando fuerzas dinámicas son predominantes sobre el calor y efectos de transferencia de masa. En este caso, la interfase de la burbuja-agua puede ser descrita por  $r = R(t)$  [65]. A cada instante, un equilibrio entre la presión en el líquido en el punto  $M$  en la superficie,  $P_1(M)$  y en la presión dentro de la burbuja y la tensión superficial existe, pueden ser escritos como [9]:

$$P_1(M) = P_v + P_{g0} \left( \frac{V_0}{V} \right)^k - C\sigma \quad (3.1)$$

donde:

$\sigma$  = Es la tensión de la superficie en la interfase líquido-burbuja.

$V$  = Es el volumen instantáneo de la burbuja.

$V_0$  = Es el volumen del valor inicial de la burbuja.

$C$  = Es la curvatura local de la burbuja.

La presión dentro de la burbuja se descompone en dos presiones parciales:

$P_v$  = La presión líquida de vapor a la temperatura ambiente y la presión del gas.

$P_g$  = Se relaciona con valor de la referencia  $P_{g0}$  en el volumen  $V_0$  por la ley de la condensación.

$$P_g V^k = P_{g0} V_0^k \quad (3.2)$$

La constante  $k$  está entre 1.0 para la situación isotérmica y un valor dados por  $C_p/C_v$  para el proceso adiabático.  $V_0$  y  $V$  son la referencia y los valores instantáneos del volumen de la burbuja respectivamente. Para el mono-atómico, di-atómico y gases tri-atómicos  $C_p/C_v$  es 1.667, 1.4 y 1.333 respectivamente. La dinámica de la explosión de una burbuja esférica a una presión ambiente  $P_a$  esta dada por la siguiente ecuación [9]:

$$\rho \left[ RR'' + \frac{3}{2} R'^2 \right] = P_{g0} \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3k} + P_v - P_a - \frac{2\sigma}{R} \quad (3.3)$$

donde:

$P_a$  = Es la presión ambiente al nivel del centro de la burbuja y los comillas denotan tiempos derivados.

Esta ecuación es llamada la ecuación de *Rayleigh-Plesset*, sujeta a las condiciones iniciales, del radio de la burbuja contra tiempo. Cuándo la presión ambiente,  $P_a$ , es constante, la ecuación (3.3) es integrable y para el comportamiento, cuando  $k \neq 1$  llega a ser [9]:

$$R'^2 = \frac{2}{\rho} \left[ \frac{P_g}{3(1-k)} (1 - \varepsilon^{3k-3}) + \frac{P_v - P_a}{3} (1 - \varepsilon^{-3}) - \frac{\sigma}{R} (1 - \varepsilon^{-2}) \right] \quad (3.4)$$

cuando:

$$\varepsilon = \frac{R}{R_{\max}} \quad (3.5)$$

y la ley de compresión del gas es:

$$P_g R^{3k} = P_{g0} R_0^{3k} \quad (3.6)$$

En el radio máximo y mínimo de la burbuja,  $R' = 0$ . Como resultado, utilizando la ecuación (3.4), la relación siguiente entre  $P_{g0}$ ,  $R_0$  y  $R_{\max}$  es obtenida:

$$P_{g0} = \frac{3(1-k)}{(1-\varepsilon_0^{3k-3})} \left[ \frac{P_a - P_v}{3} (1 - \varepsilon_0^{-3}) + \frac{\sigma}{R} (1 - \varepsilon_0^{-2}) \right] \quad (3.7)$$

con:

$$\varepsilon_0 = \frac{R_{\min}}{R_{\max}} = \frac{R_0}{R_{\max}} \quad (3.8)$$

Durante la expansión de la burbuja, la evaporación sucede en un esqueleto líquido, en el contacto con vapor más alto de temperatura dentro de la burbuja, cuya anchura es igual a la longitud térmica de la difusión. De manera similar, la condensación sucede durante el colapso de la burbuja. El calor latente de la evaporación entre el vapor y el esqueleto líquido causa una variación de la temperatura en el líquido que afecta la temperatura de vapor y finalmente, la presión de vapor [9,45].

Tal efecto es más importante en la temperatura más alta del agua; mientras está cerca de 20 °C, la variación de la temperatura en el esqueleto líquido debido a este efecto es una fracción de 1 °C, causando sólo una variación insignificante en la presión de vapor. Por consiguiente, la evolución de la burbuja puede ser asumida isotérmicamente para la mayor parte de su vida, menos durante el crecimiento inicial, cuando el plasma inicial puede enfriarse adiabáticamente hasta que la burbuja alcance su radio máximo, después de que el vapor empiece a condensar debido a la concentración del burbujeo. Para justificar una disminución en la temperatura del vapor entre múltiples ciclos de la burbuja se asume simplemente que la refrigeración del contenido de la burbuja sucede

### ***CAPÍTULO III***

en una manera progresiva a finales de cada ciclo de burbuja, cuando el vapor casi es condensado casi completamente [9,45].

# CAPITULO IV

## ANÁLISIS Y RESULTADOS DEL MECANISMO DE LA RUPTURA ELÉCTRICA EN AGUA

### 4.1 Generalidades

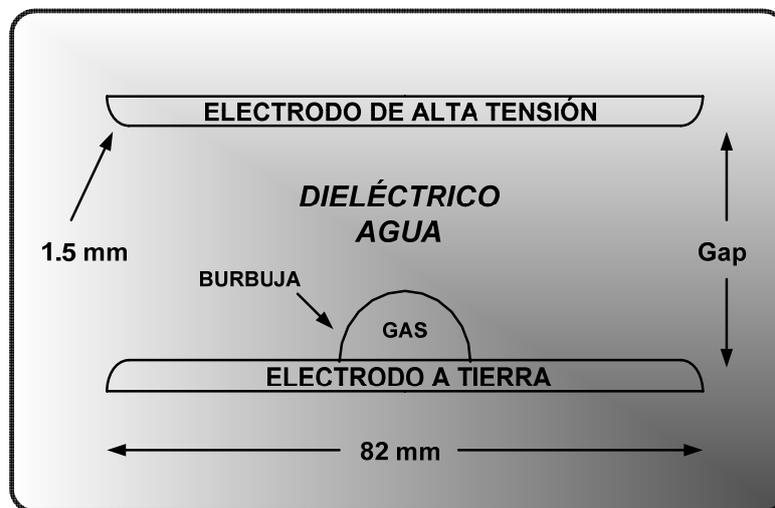
Investigaciones previas han manifestado que una burbuja de gas tiene el papel de iniciar la ruptura eléctrica en el líquido dieléctrico. El campo eléctrico principal del gap estaría intensificado dentro de la burbuja debido a la diferencia de permitividad entre el líquido dieléctrico y el gas en la burbuja. Una primera descarga sería iniciada en la burbuja, esto debido a la fuerza dieléctrica baja del gas en la burbuja y se propagaría subsiguientemente en el gap principal. Los resultados obtenidos han señalado que una burbuja de vapor es generada y que ésta tiene la siguiente dinámica en el gap principal después de la aplicación de un pulso de disparo: generación, crecimiento, contracción y colapso, por consiguiente estas condiciones son ideales para la ruptura del medio, dando como resultado la formación del canal plasmático entre los electrodos.

Los resultados obtenidos de la ruptura en el gap de agua serán presentados y discutidos en este capítulo. Las simulaciones del campo eléctrico se realizaron con la configuración de electrodos planos paralelos, con una burbuja de gas en el centro del electrodo de tierra; utilizando el software Quickfield, 2-dimensiones [66], el cual es un paquete que puede resolver problemas de tipo magnetostático, electrostático, de flujo de corriente, etc., mediante el cálculo numérico basado en elemento finito. Para nuestro propósito solamente se utilizó el bloque electromagnético, el cual se presenta en el Apéndice A. Los acontecimientos de la posruptura y prerruptura en la burbuja de gas generada en el electrodo a tierra, así como una burbuja inyectada en el gap y sujeta a un campo eléctrico son mostrados y son interpretados en base a las simulaciones obtenidas y resultados experimentales realizados en trabajos [68]. Finalmente, una serie de resultados de simulaciones del campo eléctrico son presentados incluyendo una distorsión del campo, en base a un electrodo disparador (trigger) el cual se encuentra en el centro del electrodo a tierra en el cual se genera la burbuja.

## 4.2 Simulación del campo eléctrico

### 4.2.1 Simulación con una configuración de electrodos planos paralelos, usando como dieléctrico agua y gas en una burbuja hemisférica

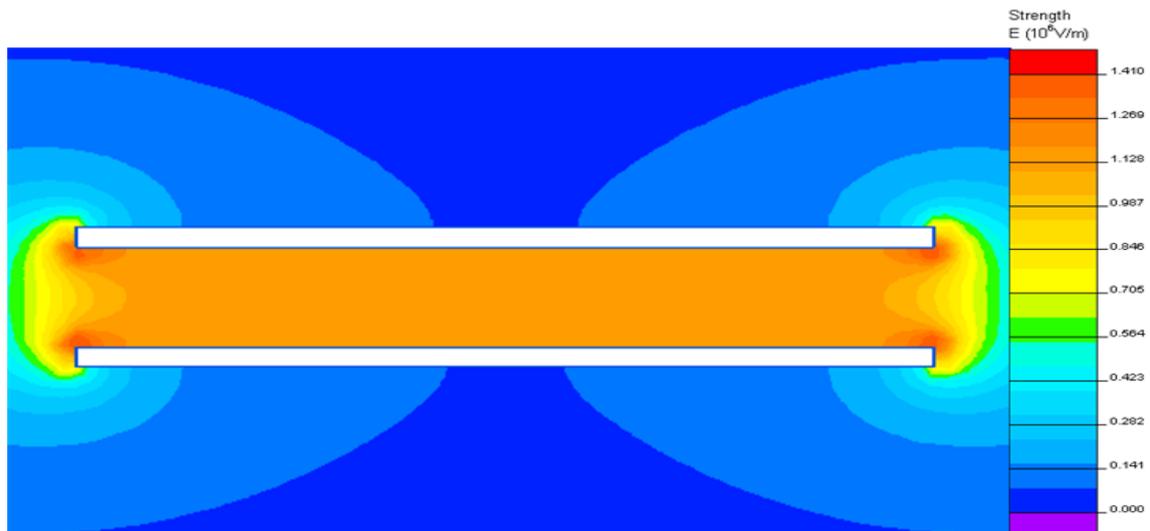
La configuración de los electrodos investigada fue la de planos paralelos, en el cual una burbuja hemisférica fue ingresada en el centro del electrodo a tierra y se considero el efecto de ésta en el campo aplicado. Para determinar la intensidad del campo eléctrico del gap en agua, se utilizó el software Quickfield, 2-dimensiones [66]. En la figura 4.1 se muestra la configuración de electrodos planos paralelos que se utilizó en la simulación, considerando un perfil en los electrodos de un radio de curvatura de  $r = 1.5 \text{ mm}$  [4,5].



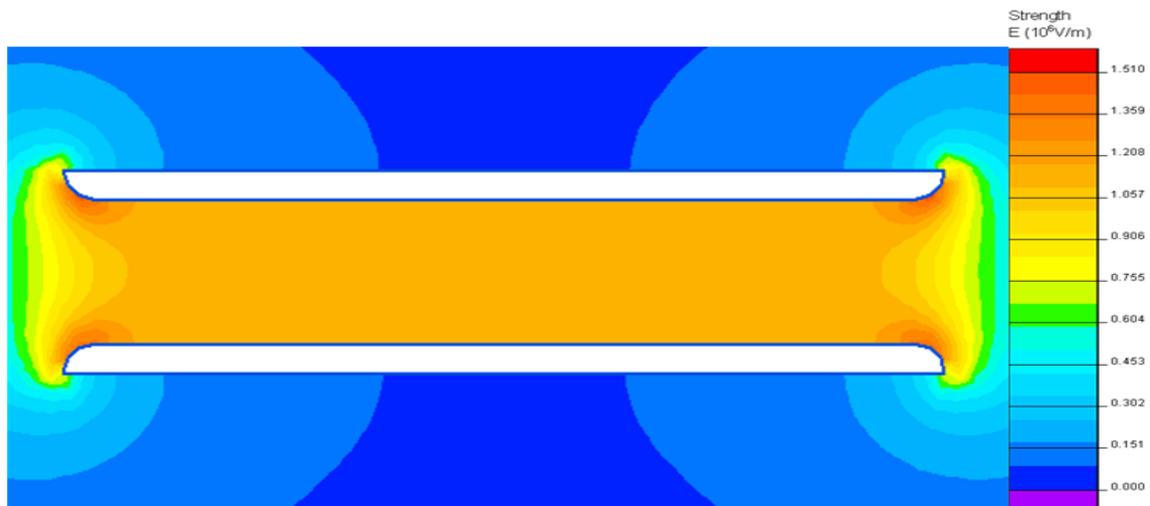
*Figura 4.1 Configuración de electrodos planos paralelos, para la simulación del campo eléctrico.*

El radio de la burbuja que se ingreso en el centro del electrodo a tierra fue variado de acuerdo a previas investigaciones realizadas experimentalmente y el efecto de tales cambios en la distribución del campo eléctrico fue determinado [9]. La permitividad ( $\epsilon$ ), del agua fue establecida en  $\epsilon = 81$  y para el gas que llena la burbuja de  $\epsilon = 1$ .

El uso de perfiles en este tipo de arreglos de electrodos, es debido a la distorsión que se suele observar en los bordes o extremos del arreglo electródico. El desplazamiento eléctrico y también por consiguiente la intensidad de campo, son bastante elevados en el borde de las placas, por consiguiente la ruptura eléctrica tiende a ocurrir precisamente en los bordes. En la figura 4.2 y 4.3, se muestran las configuraciones equipotenciales en el gap principal utilizando un arreglo de electrodos con y sin perfil.



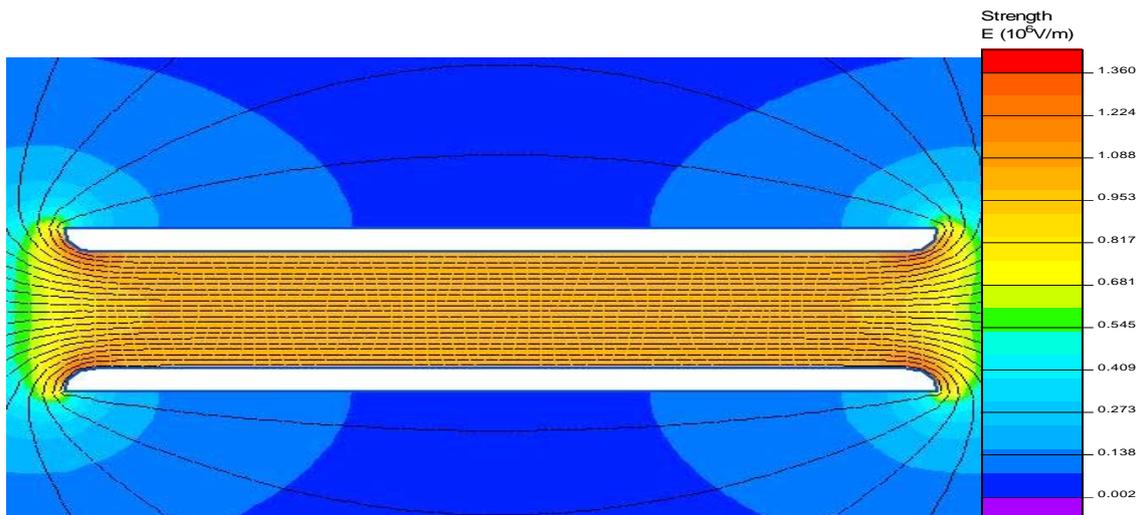
**Figura 4.2** Intensidad del campo eléctrico sin ninguna curvatura en los bordes de los electrodos, a una tensión aplicada de 17 kV a una distancia de gap de 15 mm.



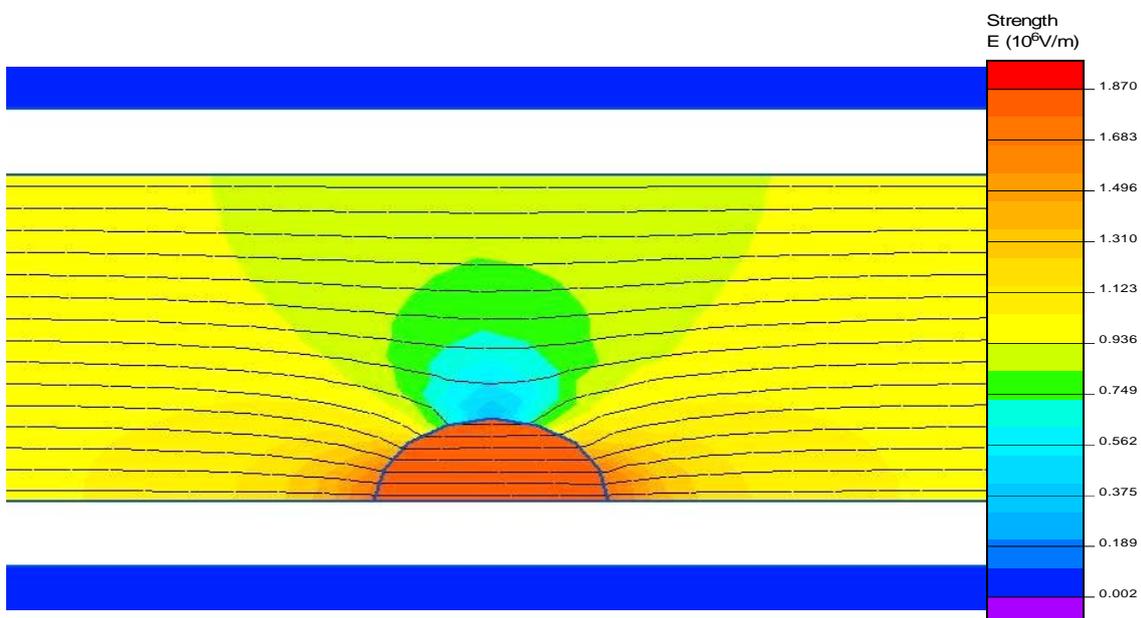
**Figura 4.3** Intensidad del campo eléctrico con una curvatura en los bordes  $r = 1.5$  mm, a una tensión aplicada de 17 kV a una distancia de gap de 15 mm.

#### 4.2.2 Resultados de la simulación del campo eléctrico

En la figura 4.4 y 4.5 se muestran las configuraciones equipotenciales en el gap principal y en la burbuja hemisférica localizada en el centro del electrodo a tierra. En la figura 4.4, muestra la generación equipotencial del gap sin la presencia de la burbuja. En la figura 4.5, se observa que el campo eléctrico es más intenso en la burbuja la cual tiene un radio de 2.7 mm, el radio de la burbuja fue tomada en base a investigaciones experimentales posteriores [9], después de un tiempo el campo se reduce, esto es a la transición del valor de permitividad del gas en la burbuja y el valor del agua.

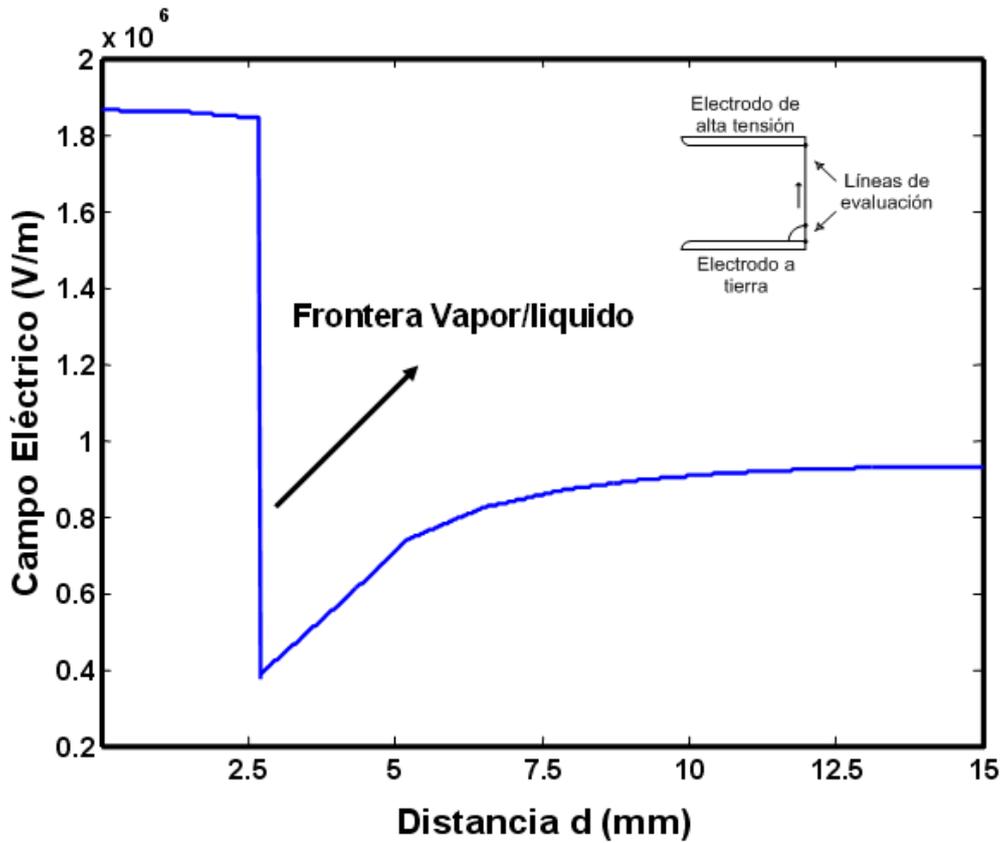


*Figura 4.4 Líneas equipotenciales, en el gap principal sin burbuja.*



*Figura 4.5 Líneas equipotenciales, en el gap principal con la burbuja.*

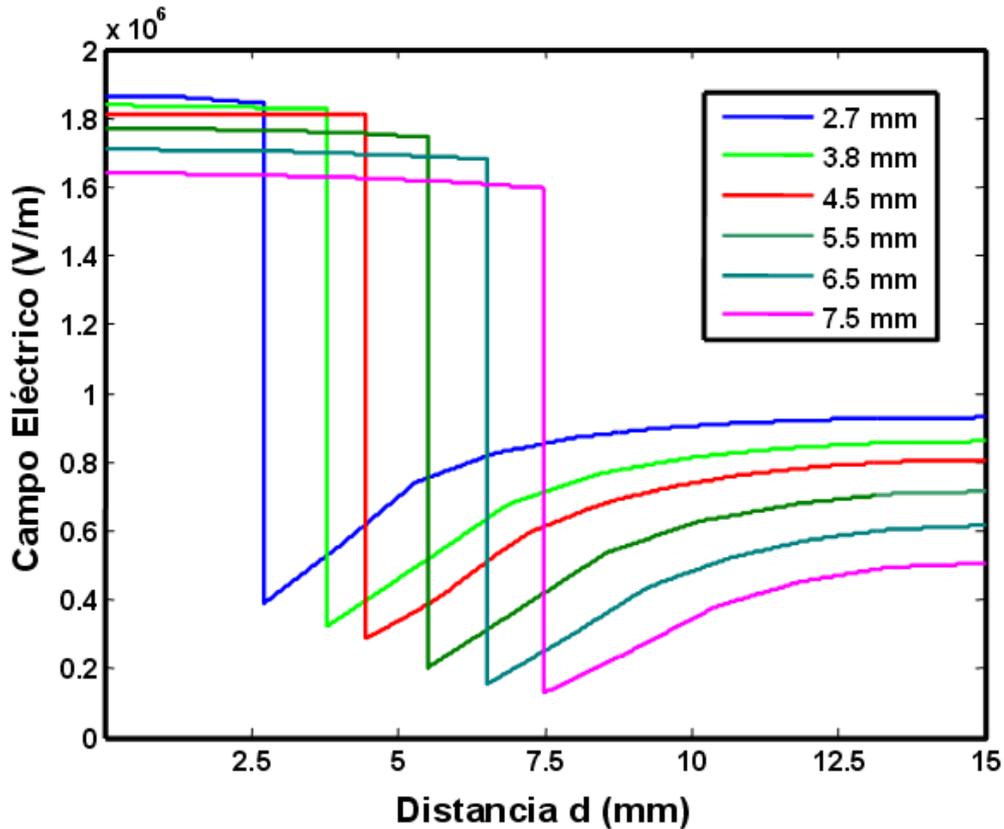
En la figura 4.6, se muestra la grafica de la intensidad del campo eléctrico que ilustra los resultados de la simulación para un radio de burbuja de 2.7 mm, utilizando una línea entre el electrodo a tierra y el electrodo de alta tensión, a una distancia de gap de 15 mm. Como se observa en la grafica, se tiene una variación aguda en la intensidad del campo eléctrico en la frontera entre el líquido y la burbuja. Para mejorar la ilustración de los resultados, se decidió dividir la línea entre los electrodos en dos líneas co-lineales. La primera línea comienza del electrodo de tierra y termina en la superficie de la burbuja y el líquido y la segunda línea empieza de la superficie de la burbuja y el líquido terminando en el electrodo de alta tensión.



**Figura 4.6** Intensidad del campo eléctrico, con una tensión aplicada de 15 kV a una distancia de gap de 15 mm, con un radio de burbuja de 2.7 mm.

La figura 4.7, se muestra la intensidad de campo eléctrico a través del gap principal para una serie de radios del crecimiento de la burbuja [9]. Como se puede observar en la figura, el campo eléctrico ha llegado a ser más intenso en la burbuja, mientras disminuye en la región que esta adelante de la burbuja.

Cuándo el radio de la burbuja es de 2.7 mm, la intensidad de campo eléctrico dentro de la burbuja es intensificado por un factor de aproximadamente dos veces el del campo eléctrico original en el agua y disminuye en la región que esta adelante de la burbuja por cerca del 50% de la intensidad original del campo eléctrico en el gap principal en ausencia de la burbuja.



*Figura 4.7 Intensidad del campo eléctrico, con valores diferentes de radios de crecimiento de la burbuja, con una tensión de 15 kV a una distancia de gap de 15mm.*

Aunque la figura 4.7, muestra que el campo eléctrico ha sido intensificado en la burbuja respecto al campo eléctrico original en el gap principal, la intensidad máxima del campo eléctrico en la burbuja fue disminuyendo conforme el radio de la burbuja aumentaba, esto se debió a que el gas dentro de la burbuja empieza a ocupar más espacio dentro del medio, debido a la expansión de la misma presentando la uniformidad del campo. El cambio es de aproximadamente 2 ~ 1.65 veces la intensidad original del campo eléctrico, cuando el radio de la burbuja fue aumentado. La intensidad del campo eléctrico delante de la burbuja ha llegado a ser más pequeño que el del campo original, conforme el radio de la burbuja es aumentado de 2.7 mm a 7.5 mm.

### 4.3 Evento de prerruptura

#### 4.3.1 Tensión aplicada a través del gap de agua

El tipo de tensión aplicada a los electrodos tiene una influencia directa en el estudio de campos eléctricos y se pueden considerar básicamente tres tipos.

- 1) De corriente directa.
- 2) De corriente alterna.
- 3) De impulso.

1).- En el caso de corriente directa el desarrollo de la descarga depende de la polaridad de los electrodos y es el caso típico de la descarga punta plano.

2).- En corriente alterna se produce el mismo fenómeno que para corriente directa, sólo que en cada semiperiodo.

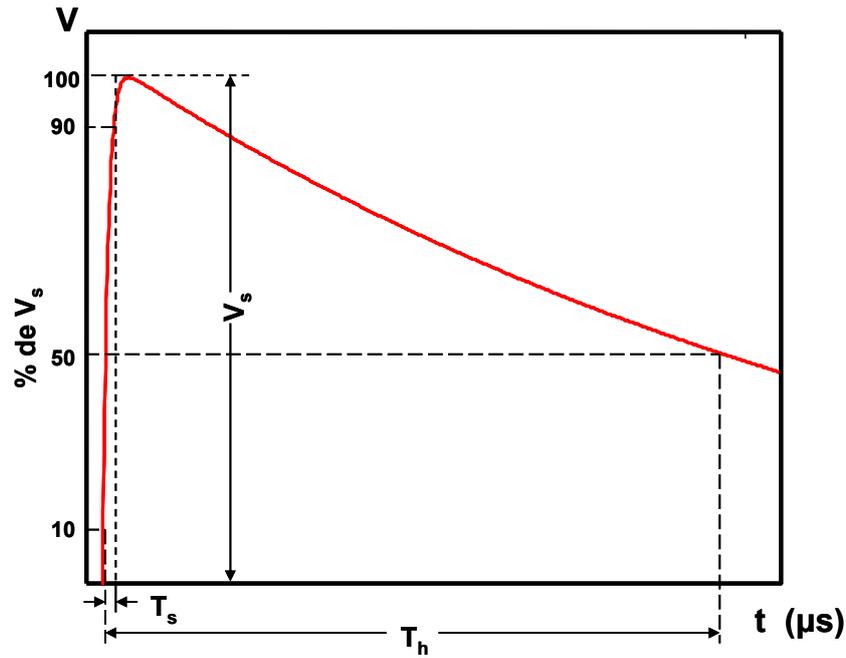
3).- Las descargas por tensiones de impulso también conocidas como descargas de choque, tienen un comportamiento diferente a las anteriores; este tipo de descarga resulta de aplicar un pulso de tensión bruscamente ascendente y de rápida extensión posterior cuya duración es del mismo orden que el tiempo necesario para la descarga. Una onda de descarga típica tiene las características que se indican en la figura 4.8 [70].

Se denomina retardo de descarga al tiempo necesario para que la descarga se lleve a cabo y consta de dos partes:

- 1) Tiempo de dispersión.
- 2) Tiempo de formación.

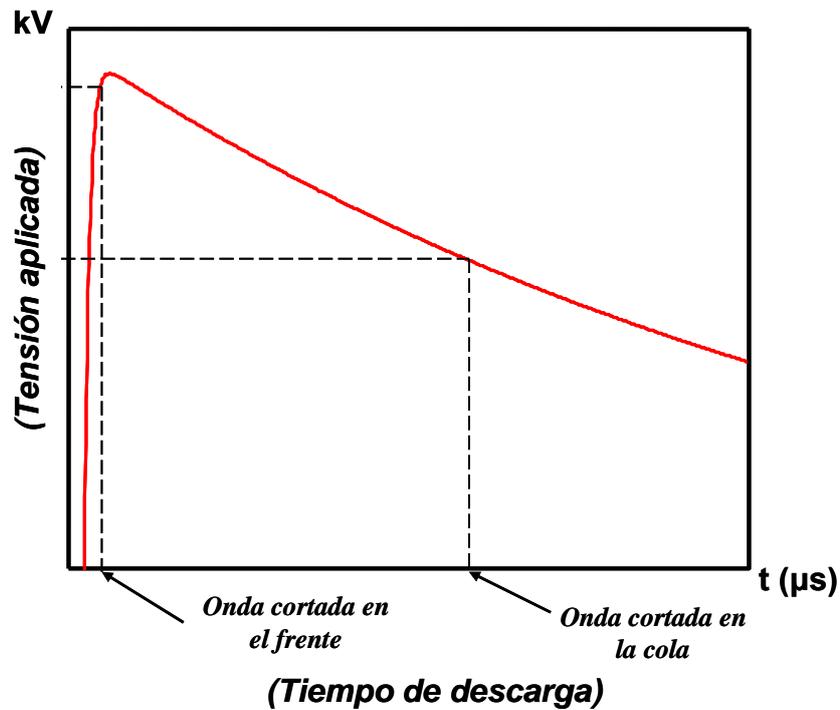
1).- Tiempo de dispersión.- es el tiempo que transcurre desde que se empieza a producir la ionización hasta el momento de la descarga es del orden de  $10^8$  segundos.

2).- Tiempo de formación.- es el tiempo real de formación de la descarga, desde el momento en que aparecen los portadores hasta la descarga misma.



*Figura 4.8* Magnitudes características de una onda de choque,  $T_s$  = tiempo de frente,  $T_h$  = tiempo de cola,  $V_s$  = valor de cresta.

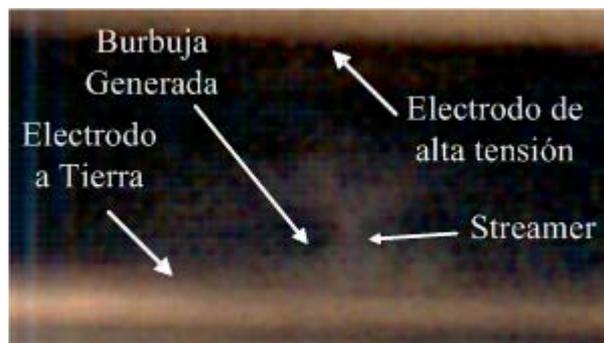
La relación de tiempo de frente ( $T_s$ ) y el tiempo de cola ( $T_h$ ) se expresa en  $\mu s$ . La descarga puede ocurrir en el frente de la onda o en la cola según se muestra en la figura 4.9 [70].



*Figura 4.9* Tiempos en que puede ocurrir la descarga.

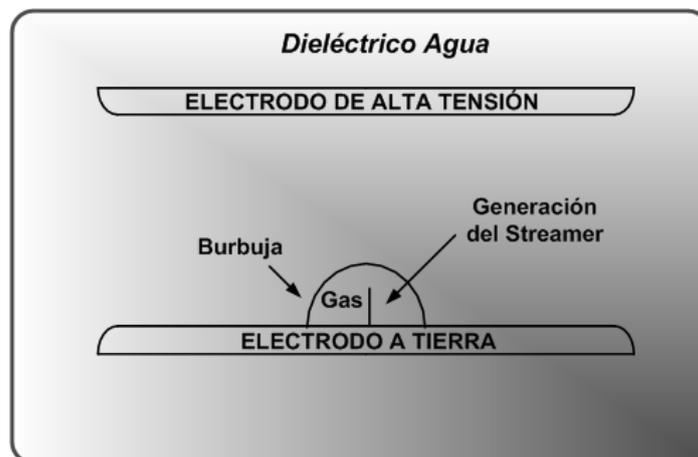
### 4.3.2 Intensidad del campo eléctrico en el gap principal después de la propagación del streamer dentro de la burbuja

La intensidad del campo eléctrico en un eje perpendicular a los electrodos y pasando por el centro de la burbuja (eje Y) para el gap de agua, fue simulado para el sistema de electrodos planos paralelos. Se asumió que una avalancha eléctrica, inicia dentro de una burbuja de gas que fue transformado a un streamer y así propagarse dentro de la burbuja hacia el electrodo de alta tensión, tal como se muestra en la figura 4.10.



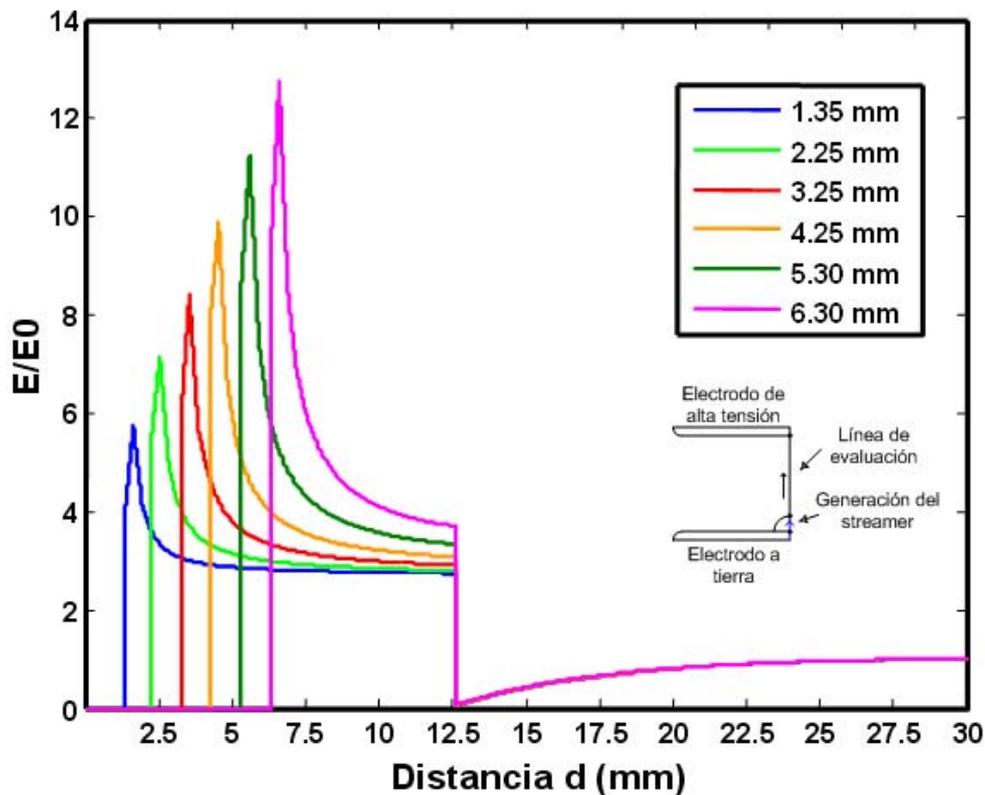
**Figura 4.10** Imagen de prerruptura capturada por una cámara de alta velocidad, con un voltaje de 16 kV a una distancia de gap de 8.7 mm [12].

El radio de la burbuja fue tomado en base a previas investigaciones experimentales [9]. Este streamer fue considerado para producir un canal conductor dentro de la burbuja. En base a las investigaciones realizadas por Larsson [47,52], las simulaciones se efectuaron como se indica en la figura 4.11, trazando una línea conductora en el centro de la burbuja, generando un puente parcial entre la superficie del electrodo a tierra y la superficie de la burbuja.



**Figura 4.11** Generación del streamer dentro de la burbuja.

Como se observa en la figura 4.12, el campo eléctrico dentro de la burbuja y delante del streamer fue intensificado después de la iniciación de la descarga y el establecimiento de un canal conductor en el interior de la burbuja, dicho canal fue simulado para varias longitudes de propagación del streamer.

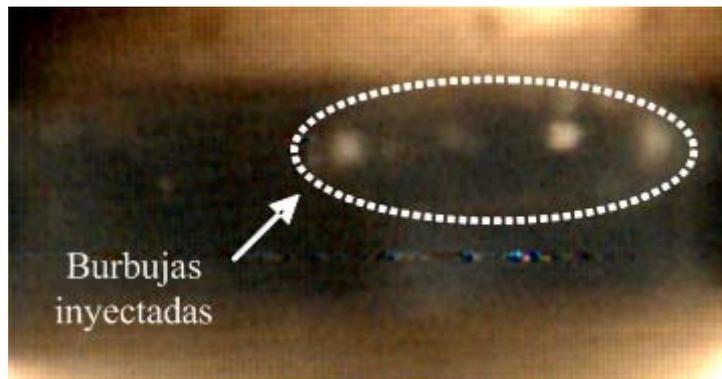


*Figura 4.12* Factor de intensidad del campo eléctrico del gap de agua. Después de la propagación del streamer en la burbuja, estableciendo un canal conductor en la burbuja.

El factor de intensificación del campo eléctrico aumentó cuando el streamer se propaga dentro de la burbuja. Cuando la longitud del streamer estuvo cerca del diámetro de la burbuja, de la distancia del gap, el campo eléctrico fue  $\sim 7.5$  veces de los valores originales sin la burbuja en el gap de agua. El campo eléctrico fuera de la burbuja en el gap de agua es mucho menor que los valores originales.

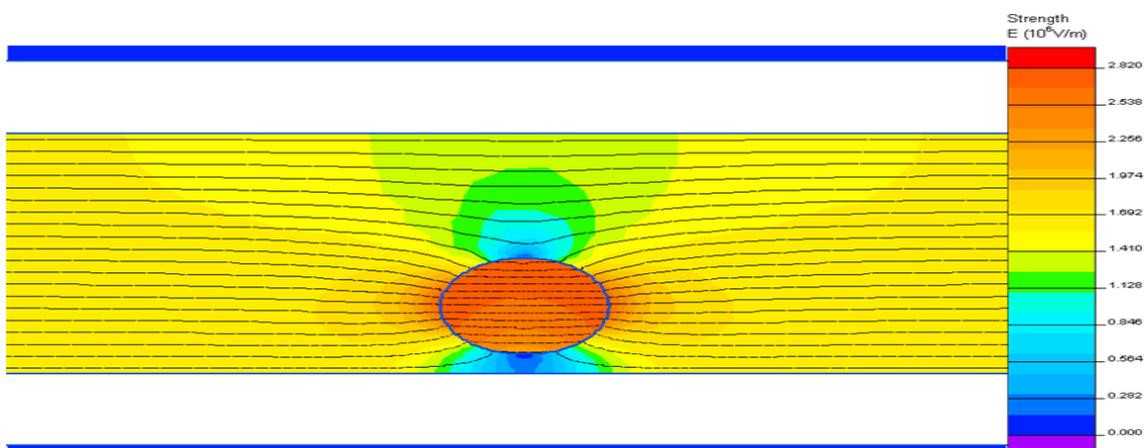
### 4.3.3 Streamer de prerruptura de una burbuja inyectada

La formación de la burbuja tiene un papel crucial en la generación de un streamer en el gap principal y la ruptura final. En investigaciones previas [68]), para poder observar aún más el efecto del campo eléctrico en la burbuja, una pequeña cantidad de gas fue inyectada en la región del electrodo a tierra, como se muestra en la figura 4.13.

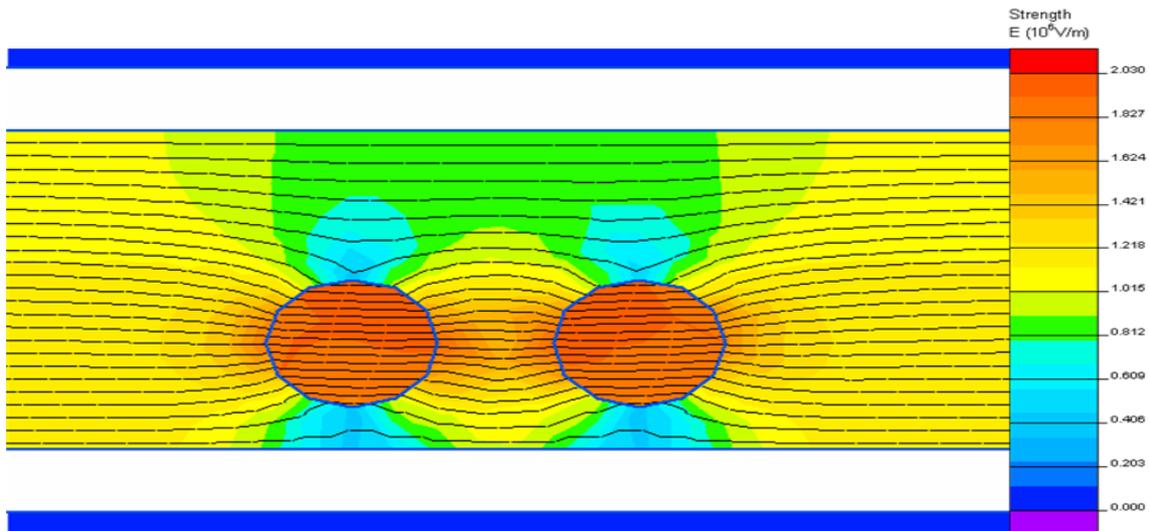


**Figura 4.13** Burbuja inyectada en el gap principal con una distancia de gap de 10 mm, a un voltaje de 16 kV [67].

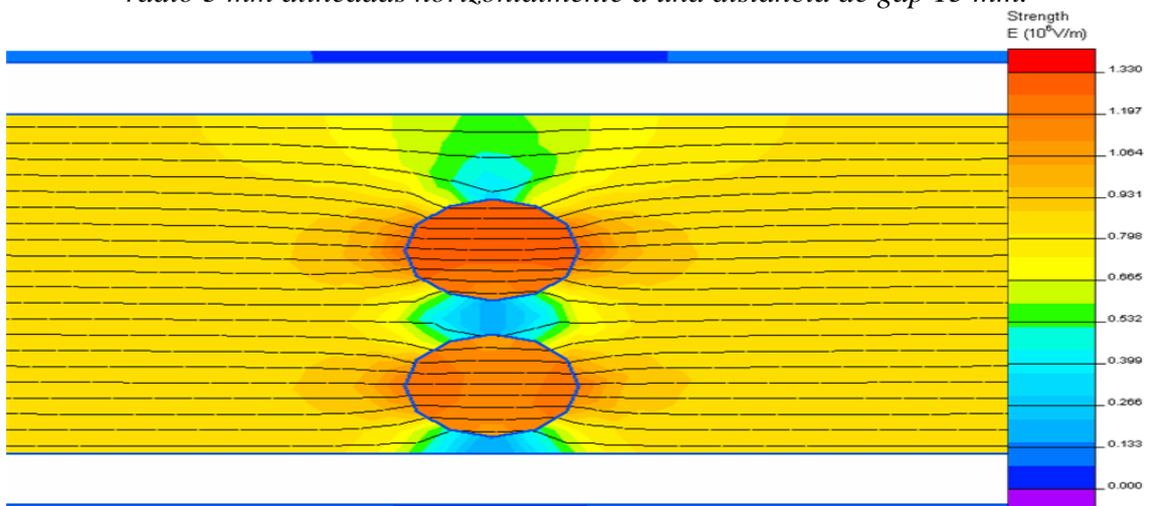
En la figura 4.14, se muestran las líneas equipotenciales en el gap principal con la presencia de burbujas inyectadas en el medio dieléctrico con un radio de 3 mm [68], para un voltaje aplicado de 16 kV a través de una distancia de gap de 10 mm; el movimiento de la burbuja dentro del medio es muy irregular las simulaciones se realizaron para una burbuja, para dos burbujas alineadas verticalmente y dos burbujas alineadas horizontalmente, el cual podemos observar que el campo eléctrico es mas intenso en la burbuja, después de un tiempo el campo se reduce, estos es debido a la transición del valor de permitividad.



**Figura 4.14** Líneas equipotenciales, en el gap principal con una burbuja inyectada de radio 3 mm, a una distancia de gap 15 mm.

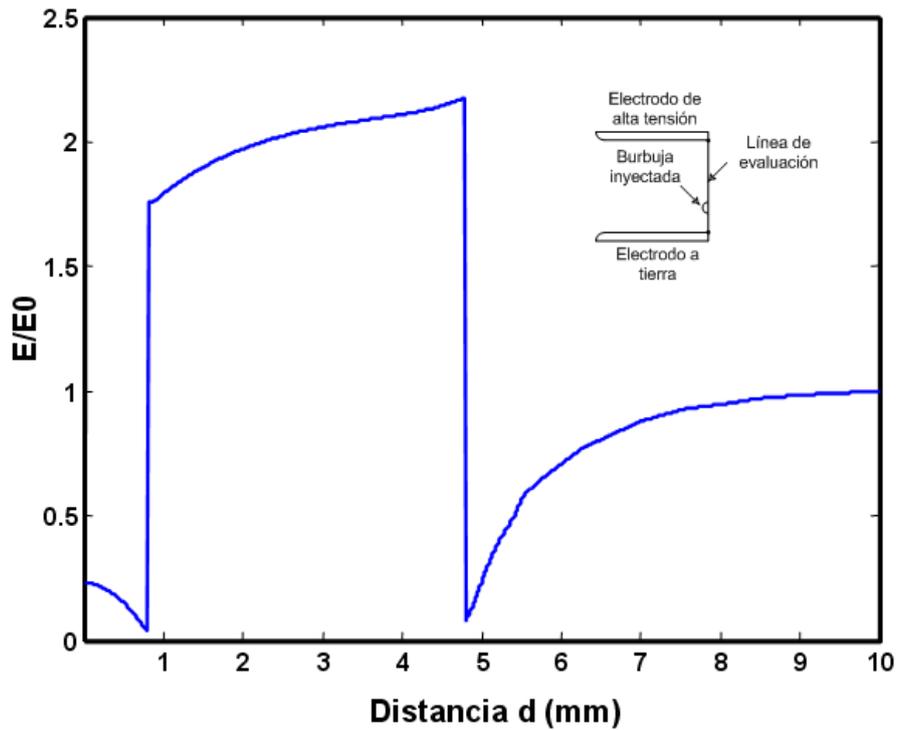


**Figura 4.15** Líneas equipotenciales, en el gap principal con dos burbujas inyectada de radio 3 mm alineadas horizontalmente a una distancia de gap 15 mm.

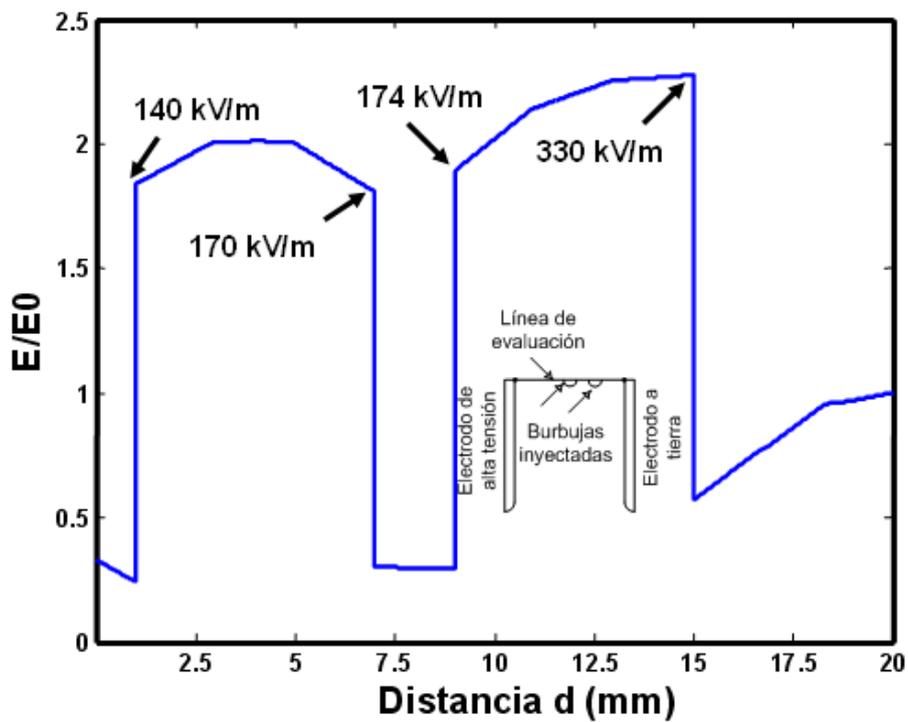


**Figura 4.16** Líneas equipotenciales, en el gap principal con dos burbujas inyectadas de radio 3 mm alineadas verticalmente, a una distancia de gap 15 mm.

En la figura 4.17 se muestra la intensidad del campo eléctrico en la burbuja inyectada artificialmente, el cual se obtuvo trazando una línea perpendicular entre el electrodo a tierra y el electrodo de alta tensión, pasando dicha línea por el centro de la burbuja inyectada, el mismo procedimiento fue efectuado para la ubicación de las burbujas tanto en horizontal como en vertical para una distancia de gap de 10 mm y una tensión aplicada en el electrodo de alta tensión de 16 kV.

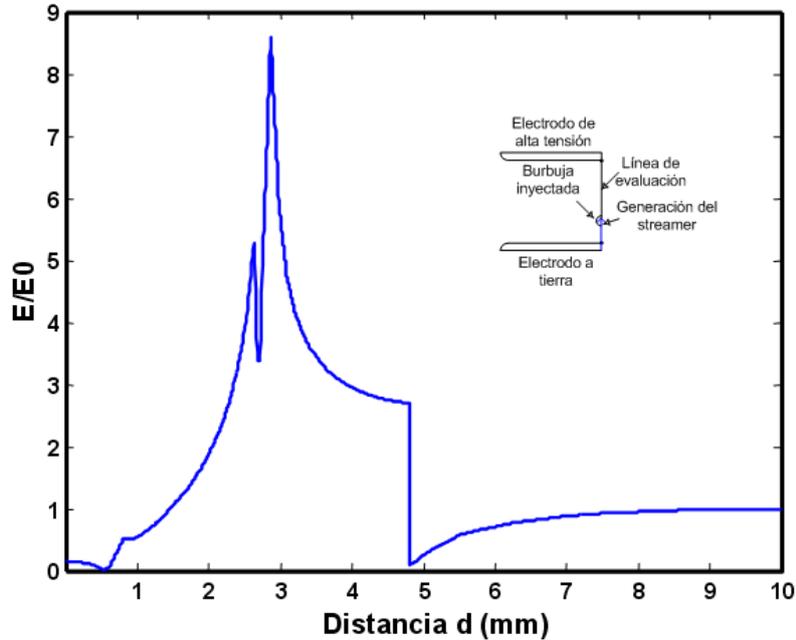


*Figura 4.17* Factor de intensidad del campo eléctrico del gap de agua. Incluyendo una burbuja inyectada, con un diámetro de 3 mm, con una tensión de 16 kV, a una distancia de gap de 10 mm.

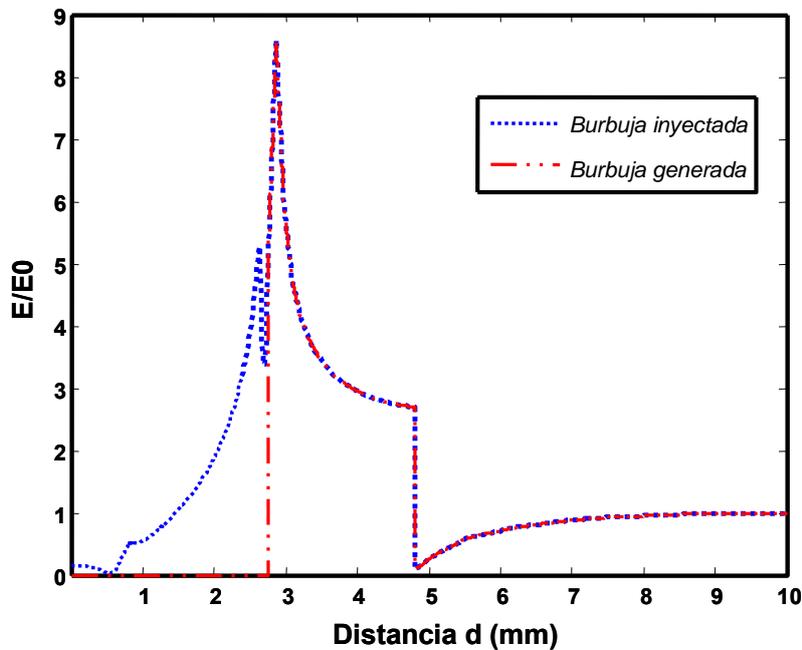


*Figura 4.18* Factor de intensidad del campo eléctrico del gap de agua. Incluyendo dos burbujas inyectadas en forma vertical, con un diámetro de 3 mm, con una tensión de 16 kV, a una distancia de gap de 10 mm.

En las figuras 4.19 y 4.20 muestran las intensidades del campo eléctrico en el gap de agua para un nivel de tensión de 17 kV a una distancia de gap de 10 mm, después de la propagación del streamer, así como la comparación que existe del streamer entre la burbuja generada en el electrodo a tierra y la burbuja inyectada en el medio dieléctrico.



*Figura 4.19* Factor de intensidad del campo eléctrico del gap de agua. Después de la propagación del streamer en la burbuja inyectada de radio 3 mm.

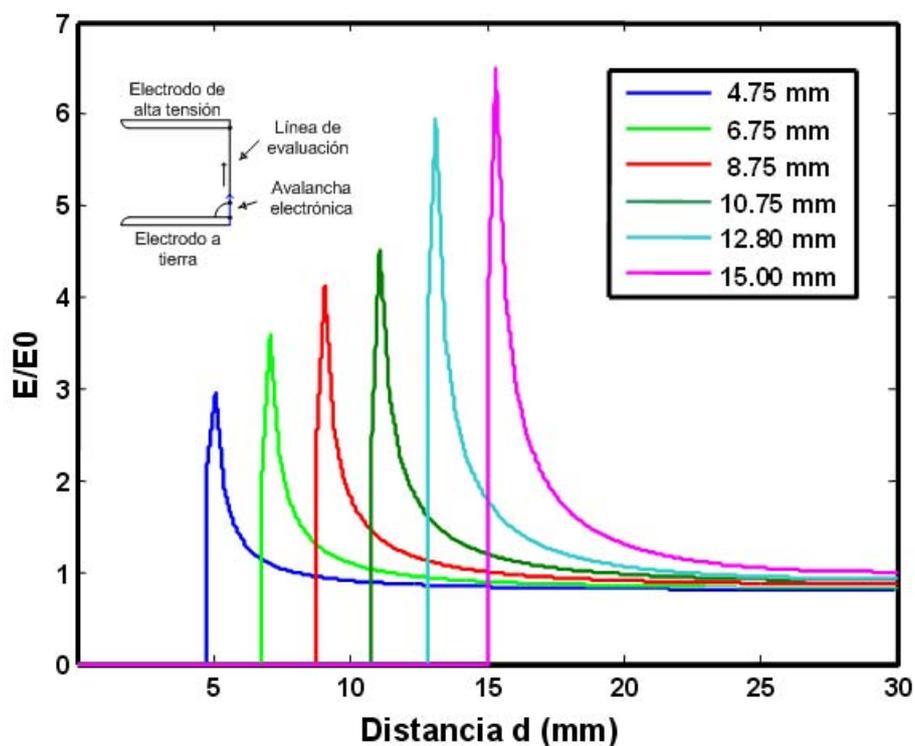


*Figura 4.20* Factor de intensidad del campo eléctrico del gap de agua. Con una burbuja inyectada por el electrodo a tierra y una burbuja generada en el electrodo a tierra, después de la propagación del streamer en la burbuja.

#### 4.3.4 Intensidad del campo eléctrico en el gap principal después de la avalancha electrónica

Para investigar la distribución del campo eléctrico después del streamer total de la burbuja, la intensidad de campo eléctrico en el gap de agua asociado con una burbuja de gas en un sistema de electrodos planos paralelos con agua como dieléctrico fue simulada utilizando el software Quickfield [66]. La situación modelada fue para una burbuja hemisférica en el centro del electrodo a tierra en el que un streamer había sido engendrado por todo el radio perpendicular a los electrodos, el campo fue determinado a todo lo largo del gap.

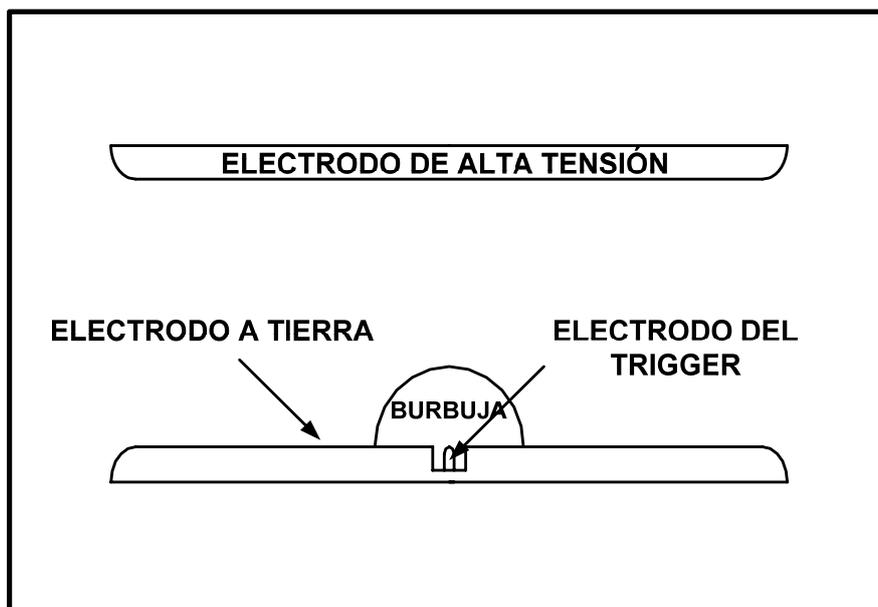
El canal conductor fue simulado por una línea conductora en el centro de la burbuja [47,52]. En la figura 4.21 se muestra la intensidad de campo eléctrico en el gap principal que fue intensificada después de la iniciación de la descarga en la burbuja y el establecimiento de un canal conductor en la burbuja y este es terminado en la superficie de la burbuja. El factor de aumento del campo eléctrico incremento con forme el radio de la burbuja es aumentado.



*Figura 4.21* Factor de intensidad del campo eléctrico del gap de agua. Después de la iniciación de la avalancha en la burbuja.

#### 4.4 Simulación del campo eléctrico con una configuración de electrodos planos paralelos, incluyendo distorsión del campo eléctrico

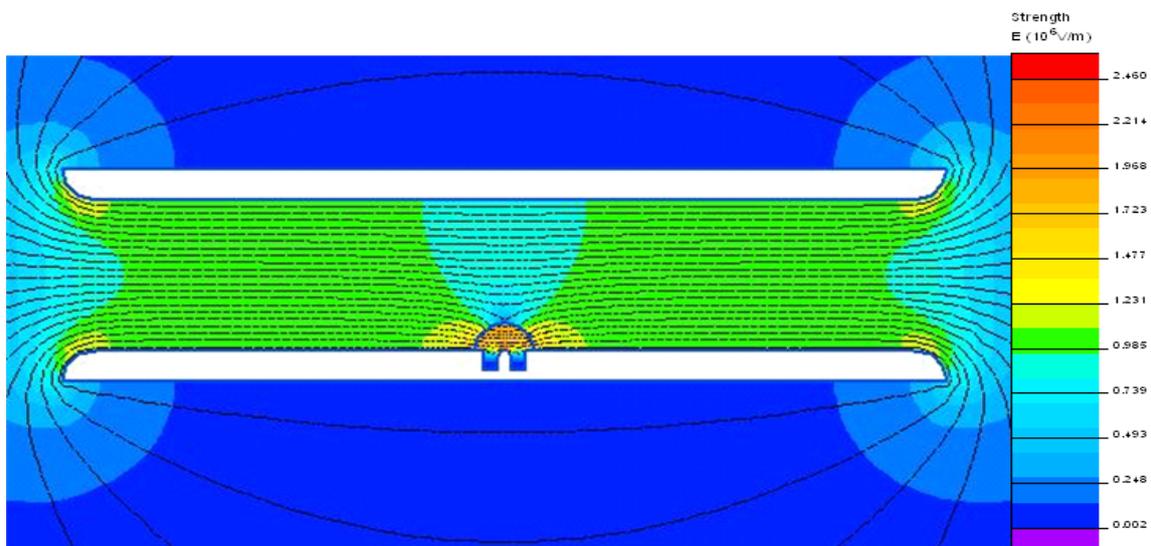
Para investigar el efecto de la distorsión del campo eléctrico, en la distribución de campo eléctrico dentro de la burbuja generada, el campo eléctrico fue simulado para la configuración de electrodos planos paralelos con un electrodo disparador (trigger) en forma de alfiler, colocado en el centro del electrodo a tierra. Una burbuja hemisférica fue colocada en el centro del electrodo del trigger, como se muestra en la figura 4.22. Como el potencial del electrodo del trigger es el mismo que el electrodo conectado a tierra después de la ruptura en el gap del trigger, este potencial se consideró cero. El electrodo trigger tiene una punta hemisférica, con un radio de 1.2 mm. La permittividad del agua fue tomada de  $\epsilon = 81$  y para la burbuja de vapor de  $\epsilon = 1$ . El radio de la burbuja fue establecido de acuerdo a investigaciones experimentales realizadas previamente [9].



**Figura 4.22** Configuración de electrodos planos paralelos, para la simulación del campo eléctrico, incluyendo el electrodo del trigger para la distorsión del campo eléctrico.

La figura 4.23, se muestra los resultados de la simulación como una distribución de líneas equipotenciales en el gap, en el cual se incluye la distorsión del campo eléctrico y la burbuja hemisférica localizada en el centro del electrodo trigger. En la figura 4.24, muestra la intensidad de campo eléctrico en un eje perpendicular a la superficie de los electrodos principales, pasando por el centro del electrodo trigger. Como se puede observar, la intensidad del campo eléctrico en el fin de la región del trigger está cerca

del 2.1 veces del campo eléctrico original en ausencia de la burbuja. Con la distancia creciente del trigger, hasta del 5% del gap principal por encima del trigger, la disminución de campo eléctrico es de 1.9 veces del campo eléctrico original, que es significativamente diferente del fin de la intensidad de campo eléctrico al trigger. La magnitud del campo eléctrico dentro de la burbuja es aproximadamente constante y es 1.9 veces el campo eléctrico original en ausencia de la burbuja. Puede ser visto que la distribución del campo eléctrico es aproximadamente constante en el eje dentro de la burbuja.



*Figura 4.23* Distribución de las líneas equipotenciales, para una tensión aplicada de 16 kV para un gap de 15 mm.

Después de la aplicación de un pulso de disparo al electrodo del trigger, ocurre una ruptura entre el electrodo del trigger y el electrodo a tierra. Como consecuencia de la disposición de la energía almacenada en el circuito del trigger, una burbuja de gas es generada en el electrodo del trigger. La burbuja se expande en el gap principal que alcanza un radio máximo y entonces se contrae hasta el colapso final. Por lo tanto, si una alta tensión es aplicada al electrodo del trigger, la intensidad del campo eléctrico se intensifica en el vapor del agua contenido en la burbuja, debido a la gran diferencia en la permitividad del agua y el vapor del agua tal como se muestra en la figura 4.25. Debido, a que la fuerza del campo eléctrico es mucho mayor en la burbuja, permite la formación de la avalancha dentro de la burbuja, posteriormente la avalancha se convierte en un streamer y finalmente se genera la ruptura como se puede observar en la figura 4.26. El tiempo de observación del fenómeno consiste en el crecimiento y colapso de la burbuja iniciada en el trigger.

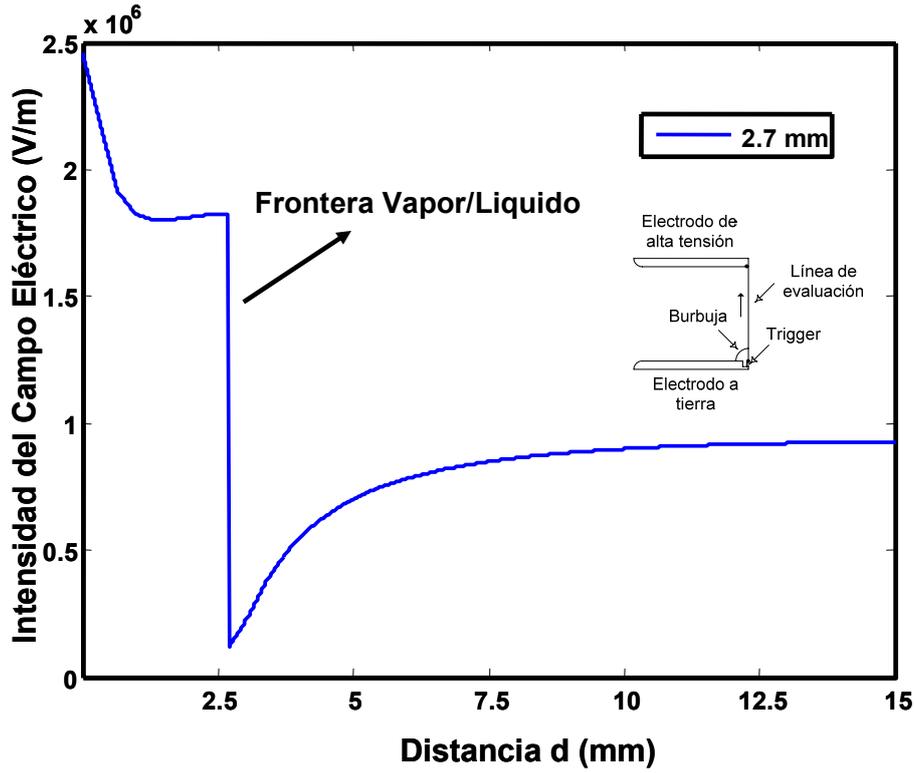


Figura 4.24 Intensidad del campo eléctrico, con una línea entre el gap del trigger al electrodo de alta tensión.

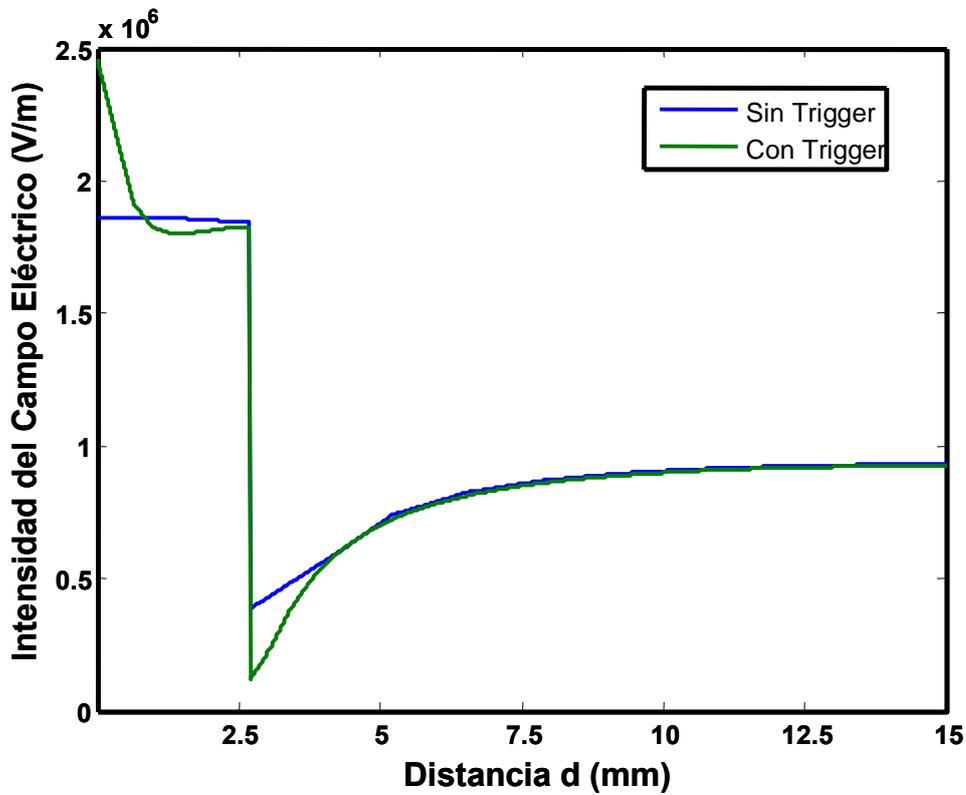
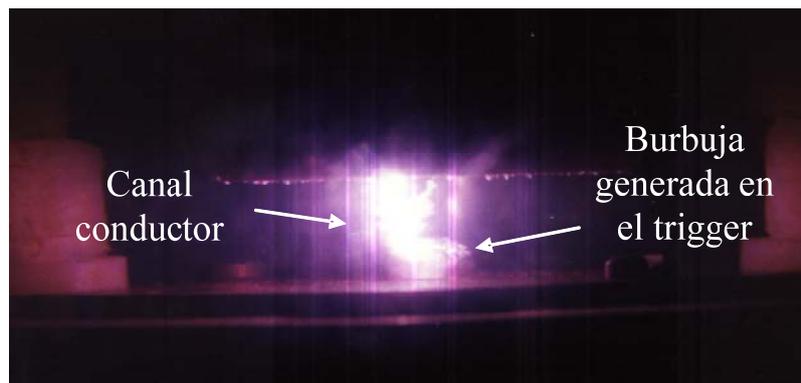


Figura 4.25 Magnitud del campo eléctrico dentro de la burbuja con y sin electrodo trigger.

#### 4.4.1 Intensidad del campo eléctrico, incluyendo distorsión del campo eléctrico (trigger), después de la propagación del streamer dentro de la burbuja

En la figura 4.26 se muestra la burbuja generada por un pulso de disparo en el trigger de 16 kV, la cual se expande en el gap en forma hemisférica. Se puede estimar de la figura, que el radio máximo de la burbuja que es  $\sim 3\text{mm}$  y el canal conductor formado durante la ruptura tiene un diámetro de  $\sim 2\text{mm}$ .

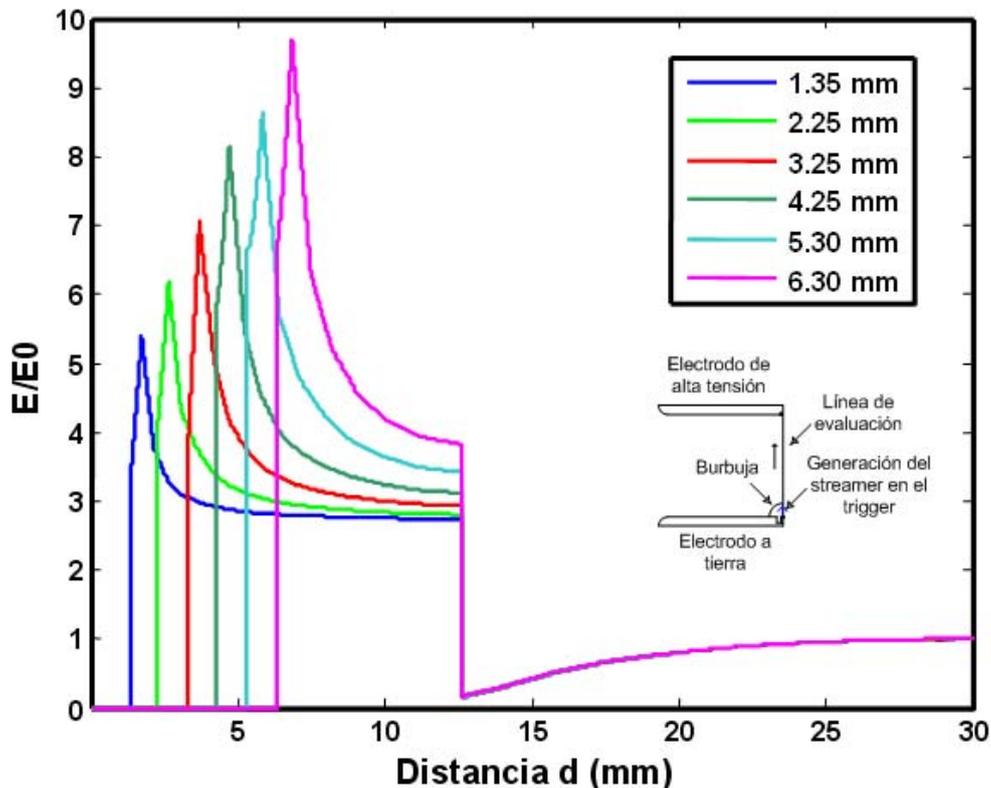
El canal conductor establecido en el gap por un puente entre los electrodos, pasa por la burbuja generada alrededor del trigger y termina en un área de la superficie del electrodo de alta tensión frente al electrodo trigger. Debido al diámetro tan pequeño de la burbuja, el canal conductor cruza la superficie de la burbuja generada por el trigger y el canal conductor es localizado entre la burbuja y el electrodo de alta tensión.



**Figura 4.26** Imágen de ruptura en el gap de agua, con un voltaje aplicado de 16 kV con una distancia de gap de 8.7 mm [69].

Se asume que parte de la energía disipada de la descarga del trigger crea una burbuja de gas en la región del electrodo trigger, debido a la vaporización del agua. La burbuja se expande en el gap entre el electrodo de alta tensión y el electrodo del trigger, cuando la burbuja de gas se expande la magnitud del campo eléctrico es mayor y disminuye en el líquido. Esto se debe a los valores de permitividades, en el gas que llena a la burbuja  $\epsilon = 1$  y la del agua  $\epsilon = 81$ . Como se puede observar en la figura 4.26 la avalancha eléctrica es iniciada dentro de la burbuja de gas que se transforma en un streamer y se propaga dentro de la burbuja hacia el electrodo de alta tensión.

Este streamer fue considerado para producir un canal conductor dentro de la burbuja. En base a las investigaciones realizadas por Larsson [47,52], las simulaciones se efectuaron como se indica en la figura 4.27, trazando una línea conductora en el centro de la burbuja generada en el trigger, generando un puente parcial entre la superficie del electrodo del trigger y la superficie de la burbuja.

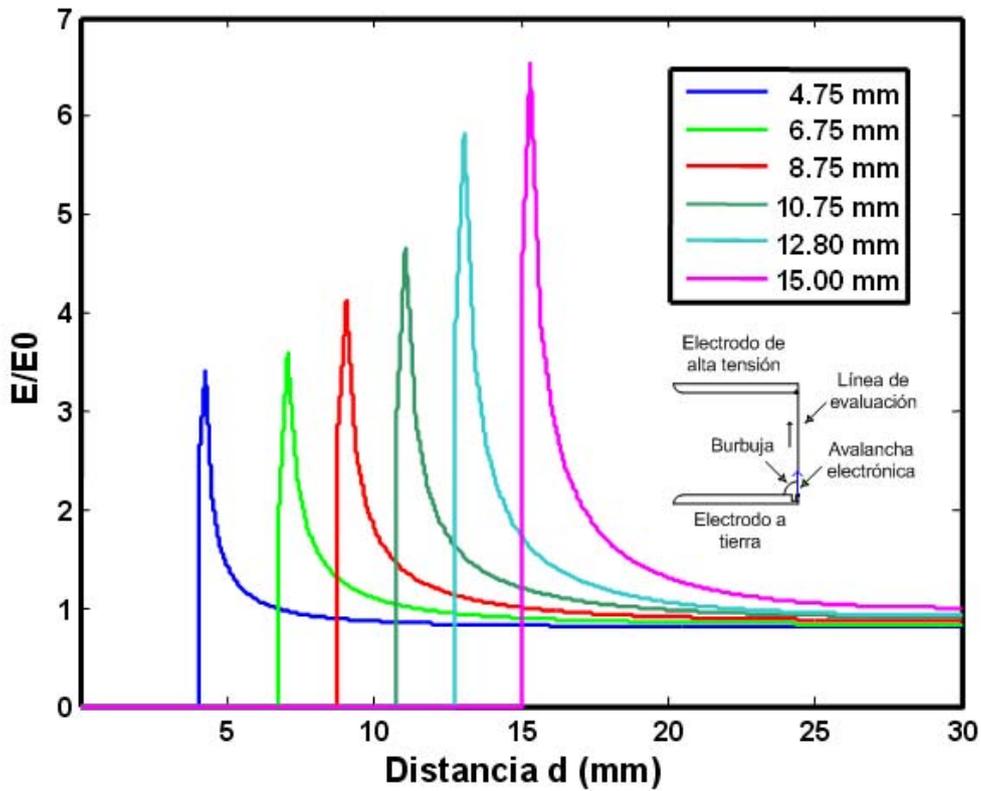


*Figura 4.27* Factor de intensidad del campo eléctrico del gap de agua. Incluyendo una burbuja hemisférica en el electrodo del trigger, después de la propagación del streamer en la burbuja.

#### 4.4.2 Intensidad del campo eléctrico, incluyendo distorsión del campo eléctrico (trigger), en el gap principal después de la avalancha electrónica

Para la distribución de campo eléctrico después del streamer, la intensidad del campo eléctrico en el gap de agua asociado con una burbuja de gas en un sistema de electrodos planos paralelos y el electrodo del trigger fue simulada utilizando el software Quickfield [66]. La simulación se realizó para una burbuja hemisférica en el centro del electrodo del trigger, en el que un streamer se generó por todo el radio perpendicular al electrodo del trigger como se muestra en la figura 4.28; el campo fue determinado a todo lo largo del gap. La diferencia que se tiene del streamer generado dentro de la

burbuja con respecto a la avalancha electrónica; es que en el streamer se generó un canal conductor dentro de la burbuja, iniciando en el electrodo del trigger y con respecto a la avalancha electrónica, se trazó una línea conductora terminando en la superficie de la burbuja, la cual esta colocada en el centro del electrodo del trigger.



**Figura 4.28** Factor de intensidad del campo eléctrico del gap de agua, incluyendo una burbuja hemisférica en el electrodo del trigger, después de la iniciación de la avalancha en la burbuja.

# **CAPITULO V**

## **CONCLUSIONES, APORTACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.**

### **5.1 Conclusiones.**

En este trabajo se han reportado una serie de resultados obtenidos en base a simulaciones utilizando el software Quickfield, con respecto a la ruptura eléctrica en agua, sobre una configuración de electrodos planos paralelos, con una burbuja de gas en el centro del electrodo a tierra. El cual se determino el efecto de la burbuja en el medio dieléctrico para la generación y propagación del streamer, así como la distorsión del campo eléctrico efectuado por el electrodo trigger. El presente trabajo nos permite establecer las siguientes características de la ruptura eléctrica en agua:

- ❖ La presencia de la burbuja en el dieléctrico juega un papel importancia para la ruptura eléctrica, esto es debido a la dinámica de la burbuja generación, crecimiento, contracción y colapso.
- ❖ Se logro reproducir el streamer generado dentro de la burbuja, el cual se reporta en la literatura y lo podemos observar en la figura 4.11 y al compararlo con los resultados obtenidos de las simulaciones figura 4.13, la ruptura eléctrica es iniciada dentro de la burbuja, esto lo podemos observar por los niveles de intensidad del campo eléctrico, posteriormente disminuye por el cambio del valor de permitividades en el medio dieléctrico. Así como la avalancha electrónica después de la generación del streamer que se muestra en la figura 4.22.
- ❖ El fenómeno de la distorsión del campo eléctrico aquí presentada, es de suma importancia ya que de esta manera podemos obtener una ruptura eléctrica mejor controlada, dicha distorsión se logro con un tercer electrodo que es del trigger, con el cual podemos obtener valores de intensidad de campo eléctrico mucho mayores que cuando no se cuenta con este electrodo, esto se puede observar en la figura 4.26.

## **5.2 Aportaciones.**

Se proporciona una serie de resultados sobre una configuración de electrodos planos paralelos con una burbuja de gas en el centro del electrodo a tierra en el cuales se observado, que la burbuja esférica de gas dentro del medio dieléctrico juega un papel muy importante en la ruptura eléctrica en el agua, para una mejor visualización del efecto de la burbuja en el medio dieléctrico se proporciona los niveles de intensidad del campo eléctrico para unas burbujas inyectadas en el gap, en el cual la generación y propagación del streamer es iniciado dentro de la burbuja que a la postre se transforma en ruptura eléctrica.

## **5.3 Recomendaciones para trabajos futuros.**

- ❖ Realizar simulaciones sobre la ruptura eléctrica en agua en base a la intensidad del campo eléctrico, se recomienda reproducirlo en un simulador que cuente con librerías de estado transitorio o variantes en el tiempo, en el modulo electromagnético, ya que los resultados presentados en este trabajo son de estado estable.
  
- ❖ En base a los resultados obtenidos de las simulaciones y con las condiciones especificadas de las mismas, se recomienda ampliar dicho estudio para un sistema de electrodo punta plano.
  
- ❖ Utilizando los datos de las simulaciones se propone generar descargas eléctricas en el agua para realizar su purificación química y biológica.

# REFERENCIAS

- [1] **Enríquez Harper G.** “Técnicas de las Altas Tensiones”. LIMUSA, Vol 1, pp. 321 – 340, Segunda Edición.
- [2] **Siegert Luís A. C.** “Alta Tensión y Sistemas de transmisión”. LIMUSA, pp. 129 – 134, México D.F. 1989.
- [3] **Bradwell A.**, “Electrical Insulation”, Meter Peregrinus LTD, 1983.
- [4] **Kuffel E, Zaengl W.S, and Kuffel J.** “High Voltage Engineering Fundamentals” Second edition, ch 4, pp. 201. 2000
- [5] **Nieto-Salazar J, K. R. Meguro Yuno, V. Mata Brauer and O. Le Saint** “Descargas Eléctricas Pulsada en Agua Parte I: Alternativas en el uso del Agua como Medio Dieléctrico”, IEEE RVP-AI’2006, Acapulco Guerrero, México.
- [6] **Nieto-Salazar J, K. R. Meguro Yuno, V. Mata Brauer and O. Le Saint** “Descargas Eléctricas Pulsada en Agua Parte II: Caracterización Experimental de la Propagación de Streamers Positivos”, IEEE RVP-AI’2006, Acapulco Guerrero, México.
- [7] **Joshi R. P, J. Qian, J. Kolb and K.H. Schoenbach**, “Model analysis of breakdown in high-voltage, water-based switches” Department of Electrical and Computer Engineering, old Dominion University, Abstract Number 10652, 2002
- [8] **Xiao S, Katsuki S., Kolb J, Kono S., Moselhy M. and Schoenbach K. H.** “Recovery of water Switches”, Modulator Symposium, Hollywood, CA, 2002
- [9] **Chahine, G. L., Frederick, G. S., Lambrecht, C. J., Harris, G. S., Mair, H. U.** “Spark-generated bubbles as laboratory scale modes of underwater explosions and their use for validation of simulation tools”, SAVIAC Proceeding 66<sup>th</sup> Shock and vibrations Symposium, Biloxi, Ms, Vol. 2, pp. 265-276, November 1995
- [10] **XiniPei Lu, Laroussi Mounir, Kolb Juergen, Susumu Kono and Schoenbach K. H.** “Temporal Emission behavior of pulsed discharge in water”, Journal of Physics D: Applied Physics. 9, 24. 2002
- [11] **Roth Arnold, Gérard de Senarclens and Amsler Joachim.** “Técnicas de la alta tensión”. LABOR, pp 537-541. Barcelona. 1966.
- [12] **Saniei M., MacGregor S. J., Fouracre R. A.**, “Investigation of the mechanisms leading to the electrical breakdown of a triggered water gaps”, IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP 2003.

## REFERENCIAS

- [13] **Hackam R.** “Breakdown potential of water vapour between plane parallel electrodes”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 4., No. 8 , pp1134-1139, 1971
- [14] **Timoshkin I. V., Mackersie J. W. and MacGregor S. J.** “Plasma channel microhole drilling technology”, *Proceeding of 14th IEEE International Pulsed Power Conference, Dallas, USA, Vol. 2, pp 1336-1339, 2003*
- [15] **Meidani Naji A. R. and Hasan M.** “Mathematical and physical modeling of bubble growth due to ultrasound”, *Applied Mathematical Modelling* 28, 33-351, 2003.
- [16] **Gavrilov I. M., Kukhta V. R., Lopatin V. V. and Petrov P. G.** “Dynamics of Pre-breakdown Phenomena in Uniform Field in Water”, *IEEE Trans. On Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 1, No. 3, pp. 496-502, 1994
- [17] **Felici, N. J.** “Blazing a fiery trail with the hounds (pre-breakdown streamers)”, *IEEE Trans. Elec. Insul.*, Vol. 23, No. 4, pp. 497-503, 1988.
- [18] **Nelson J. K.** “Dielectric Fluids in Motion”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 10, No. 11 1994, pp. 16–28, 1980.
- [19] **Fenneman D. B. and Griphover R. J.** “Experiments on electrical breakdown in water in the microsecond regima”, *IEEE Trans. Plasma Science*, Vol 8, No. 3, pp 209-213, 1980.
- [20] **Lafferty J. M.** “Vacuum Arcs Theory and Aplication”. John Wile and Sons, ISBN 0-471-06506-4, 1980
- [21] **Mesyats G. A., and Proskourousky D. I.** “Pulsed Electrical Discharge in Vacuum”, Springer series on ATOMS + PLASMAS, ISBN 3-540-50725-6, 1989.
- [22] **Katsuki S., Xiao S., Ravindra Joshi P., Larousi M. and Schoenbach K. H.** "Electrical breakdown of sub-milimeter water gaps", *Modulator Symposium, Hollywood, CA, June 2002.*
- [23] **Lide D. R. and Frederikse H. P. R.** “Handbook of chemistry and physics”, CRC Press, 78<sup>th</sup> Edition, Boca Raton, New York, USA, 1997
- [24] **Schoenbach K H.** "Electrical breakdown of submilimeter water gaps" *Proc of beams, Albuquerque, NM, June 2002.*

## REFERENCIAS

- [25] **Turnbull S. M., MacGregor S. J, Tuema F. A. and McPhee A. J.** " A self-activating high-voltage, high-energy crowbar", J. Phys. D., Appl. Phys., vol. 33, p1410-1416, 2000.
- [26] **Deng J., Stark R. H. and Schoenbach K. H.,** " Development of compact nanosecond, high voltage pulse generators with water as dielectric and as switch medium", Proc. PPS2001, Las Vegas, NV, p. 1587-90, June 2001.
- [27] **Toriyama Y. and Shinohara U.** "Electrical breakdown field intensity of water and aqueous solutions", Phys. Rev., Vol. 51, p680, 1989
- [28] **Watson P. K.** "Electrostatic and hydrostatic effects in the electrical breakdown of liquid dielectrics", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. EI-20, No. 2, pp. 395-399, 1985
- [29] **Ushakov V. Y., Semkina O. P. and Ryumin V. V.** "On the nature of pulse electrical breakdown of aqueous electrolytes", Elektronnaya Obrabotka Materialov, Vol. 2, (for English Translation, see Applied Electrical Phenomena, Vol. 2), 1972.
- [30] **Toriyama Y. and Shinohara U.** "Electrical breakdown field intensity of water and aqueous solutions", Phys. Rev., Vol. 51, p680, 1939.
- [31] **Kao K. C. and McMath J. P.** "Time dependent pressure effect in liquid dielectrics", IEEE Trans Elec Insul, Vol. EI-5, pp 64-8, 1970.
- [32] **Espinosa J. C.** "Dielectric breakdown in water", Ph.d. Thesis, The University of Texas at Austin, 2000.
- [33] **Jones H. M. and Kunhardt E. E.** "Sub-microsecond pre-breakdown and breakdown phenomena in water: influence of pressure, conductivity and gap separation", Conference record of the IEEE International conference on Electrical Insulation, USA, pp. 442-445, 1994.
- [34] **Klimkin V. F. and Ponomarenko A. G.** "Interferometric study of pulsed breakdown in a liquid", Soviet Physics, Technical Physics (English translation of Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki), Vol. 24, No. 9, pp 1067-1071, 1979.
- [35] **Jones H. M. and Kunhardt E. E.** "Development of Pulsed dielectric breakdown in liquids", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 28, No. 1, pp. 178-188, 1995.
- [36] **Klimkin V. F.** "High speed optical and statistical investigations of pre-breakdown phenomena in liquid dielectrics in the nanosecond region", Proceeding of 13<sup>th</sup> International Conference on Dielectric Liquids (ICDL'99), Nara, Japan, pp.152-155, 1999.

## **REFERENCIAS**

- [37] **Jones H. M.** “Pulsed conduction and breakdown in highly pressurised water and salt solutions and a Monte Carlo simulation of electron transport in simple liquids”, Ph.D. thesis, Polytechnic University, Michigan, USA, 1994.
- [38] **Jones H. M. and Kunhardt E. E.** “Nanosecond pre-breakdown and breakdown phenomena in water: influence of pressure, conductivity and ionic sheath formation”, Conference record of the ICDL'96, 12th International conference on conduction and breakdown in dielectric liquids, Italy, pp. 360-364, 1996.
- [39] **Giraud V. and Krebs P.** “The onset of electron localization in sub-critical water vapour”, Chemical Physics Letters, Vol. 86, No. 1, pp 76-80, 1982.
- [40] **Cobine J. D.** “Gaseous conductors”, Dover Publication, New York, USA, 1958.
- [41] **Abdullah M. and Kuffel E.** “High Voltage Engineering” Second edition, Editorial Advisory, pp. 90, 2000.
- [42] **Ohl C. D., Kurz T., Geisler R., Lindau O. and Lauterborn W.** “Bubble dynamics, shock waves and sonoluminescence”, Phil. Trans. R. Soc. Lond. A pp 269-294, 1999.
- [43] **Werner Lauterborn and Claus-Dieter Ohl,** “Cavitation bubble dynamics”, Ultrasonics Sonochemistry pp 65 – 75, 1997.
- [44] **Akhatov I., Lindau O., Topolnikov A., Mettin R., Vakhitova N. and Lauterborn W.** “Collapse and rebound of laser-induced cavitation bubble”, Physics of Fluids, Vol. 13, No. 10, pp. 2805-2819, 2001.
- [45] **Buogo S. and Cannelli G. B.** “Implosion of an underwater spark-generated bubble and acoustic energy evaluation using the Rayleigh model”, Journal of acoustic Society of America, Vol. 111, No. 6, pp. 2594-2600, 2002.
- [46] **Louisnard O.** “High bubble concentrations produced by ultrasounds in binary mixtures”, Ultrasonics Sonochemistry, Vol. 8, pp 183-189, 2001.
- [47] **Larsson A., Sunesson A., Garmer J. and Kroll S.** "Laser-triggered electrical breakdown in liquid dielectrics. Imaging of the process by the shadowing technique”, IEEE-Transactions-on-Dielectrics-and-Electrical-Insulation. April 2001, vol. 8, no. 2, pp 212-19.
- [48] **Aka-Ngnui T. and Beroual A.** “Bubble dynamics and transition into streamers in liquid dielectrics under a high divergent electric field”, J. Phys. D: Appl. Phys. 34, Pp 1408-1412, 2001.

## REFERENCIAS

- [49] **Cook Jeffrey A., Austin Gleeson M. and Randy Roberts M.** “A spark-generated bubble model with semi-empirical mass transport”, J. Acoust. Soc. Am. 101 (4), April 1997.
- [50] **Schiffers W. P., Shaw S. J. and Emmony D. C.** “Acoustical and optical tracking of the collapse of a laser-generated cavitation bubble near a solid boundary”, Physics of ultrasonics 36, pp 559-563, 1998.
- [51] **Schiffers W. P. and Emmony D. C.** “Visualization of the fluid flow field around a laser generated oscilating bubble”, Phys. Fluids 9 (11), Noviembre 1997.
- [52] **Larsson A. and Bengtsson M.** “The sequence of events in mid-gap laser-triggered electrical breakdown in liquid dielectrics”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9, No. 3, pp. 349-52, 2002.
- [53] **Xin-Pei, L., Ming-Hai L., Zhong-He J. and Yuan, P.** “Effect of ambient pressure on bubble characteristics”, Chinese Physics Letters, Vol. 19, No.5, pp 704-6, 2002.
- [54] **Kling C. L.** “A high speed photographic study of Cavitation bubble collapse”, ph.d. Thesis, University of Michigan, Ann Arbor, 1970.
- [55] **Beroual A.** “Electronic and gaseous processes in the pre-breakdown phenomena of dielectric liquids”, J. Appl. Phys. 73, 4528–33, 1993.
- [56] **Beroual A.** “Propagation and structure of streamers in liquid dielectrics” IEEE Elect. Inst. Mag. 14, 6–17, 1998.
- [57] **Blake J. R. and Gibson D. C.** “Cavitation bubbles near boundaries”, Ann. Rev. Fluid Mech. 19, 99–123, 1987.
- [58] **Lord R.** “On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity” Phil. Mag. 34, 94–8, 1971.
- [59] **Poritsky H** “The collapse or growth of a spherical bubble or cavity in a viscous fluids Proc.”, 1st US Nat. Cong. On Applied Mechanics (ASME) pp 813–21, 1962.
- [60] **Beroual A. and Bouazabia S.** “Mechanisms involved in the generation of gaseous bubbles in liquid dielectrics under DC voltage” Arch. Electr. Eng. 3, 295–303, 1999.
- [61] **Melcher J. R. and Taylor G. I.** “Electrohydrodynamics: a review of the role of interfacial shear stresses”, Ann. Rev. Fluid Mech. 1, 111–46, 1969.

## REFERENCIAS

- [62] **Garton C. G. and Krasucki Z.** “Bubbles in insulating liquids: stability in an electric field”, Proc. R. Soc. A 280, 211–26, 1964.
- [63] **Beroual A.** “Study of the influence of particles immersed in liquid dielectrics on the spatio-temporal distribution of the electric field”, PhD Thesis Wroclaw, Poland, 1979.
- [64] **Beroual A.** “Behavior of charged and uncharged bubbles in dielectric liquids subjected to electric stress”, J. Appl. Phys. **71** 1142–5, 1992.
- [65] **Chahine G. L. and Duraiswami R.** “Boundary element method for calculating 2D and 3D underwater explosion bubble behavior in free water and near structures”, Naval Surface Warfare Center, Weapons Research and Technology Department, Report NSWCDD/TR-93/44, March 1994.
- [66] **Tera Analysis**, “QuickField finite element analysis system, Version 5.1”, Denmark, retrieved August 2004 from Tera Analysis website: <http://www.quickfield.com/demo/manual.pdf>.
- [67] **Mohsen Saniei**, “Nature and mechanisms of the breakdown in a triggered water gap switch” PhD Thesis, The University of Strathclyde., Glasgow U.K, 2005.
- [68] **Góngora-Nieto M. M., Pedrow P. D., Swanson B. G. and Barbosa-Cánovas G. V.** “Impact of air bubbles in a dielectric liquid when subjected to high field strengths”, Innovative Food Science and Emerging Technologies, 4, 57-67, 2003.
- [69] **Saniei M., Fouracre R. A. and MacGreggor S. J.** “Triggering effect on the electrical breakdown of a triggered water gap”, Proceeding of the 12 th, Iranian conference on Electrical Engineering, Mashhad Iran pp 182-186, May 2004.
- [70] **López Tapia P.** “Influencia de las condiciones atmosféricas sobre las trayectorias de descargas eléctricas”, Tesis de grado de maestría, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación. México D.F. 1999.

# APÉNDICE A

## **A.1 MANUAL PRÁCTICO DEL PROGRAMA QuickField.**

**QuickField** es un paquete de **Análisis de Elementos Finitos** muy eficaz para la simulación visual de los procesos electromagnéticos, térmicos y de estado elástico. El paquete combina un conjunto de módulos de análisis basados en las últimas tecnologías de resolución con un pre - procesor muy amigable y un post - procesor realmente potente.

El pre - procesor de QuickField permite definir sus modelos muy rápidamente, con facilidad y de forma completa. Se pueden importar los fragmentos de su modelo desde AutoCAD u otros CAD. Cuando la geometría está construida, se puede realizar el mallado con gran facilidad.

Incluso no es necesario especificar el tamaño de malla, ya que una tecnología realmente sofisticada permite la modificación de los modelos automáticamente, creando una malla suave y uniforme que corresponde con la geometría de su modelo. El paquete permite determinar y modificar las cargas y las condiciones límites con independencia total de la malla generada.

El post- procesor interactivo de QuickField ayuda a analizar los resultados en diferentes formas de gráficos: líneas de campo, mapas multicolores y gráficos de diferentes cantidades a lo largo de los contornos personalizables, etc. El paquete también tiene una calculadora muy potente que permite obtener diferentes parámetros y calcular integrales de superficie y volumen en las regiones que se desee.

QuickField es una aplicación nativa de Windows que fue elaborada especialmente para esta plataforma y por tanto utiliza completamente todas las ventajas de los PC actuales. Es muy compacto, pero robusto. Se puede usar para muchas aplicaciones de modelación.

### **A.1.1 Tipos de problemas que soluciona el QuickField.**

El módulo **electromagnético de transición** esta construido para análisis de los procesos de transición en el campo electromagnético. Esta aplicable para el estudio de régimen conectar/desconectar, de los procesos de ruptura, de excitación de corriente alterna, en los mecanismos de materiales magnéticos no-lineales, de impulsos en el equipamiento electrónico poderoso y de la variedad de otros procesos electromagnéticos y equipamiento, en que AC y CC aproximaciones no se puede aplicar.

#### **Características:**

- ✚ Materiales: Permeabilidad lineal y no-lineal.
- ✚ Magnetos permanentes con curvas de magnetización lineales y no-lineales.
- ✚ Corrientes distribuidas y concentradas.
- ✚ Condiciones límites de Dirichlet y Neumann.
- ✚ Funciones especiales de aproximación para formulación asimétrica que dan una exactitud alta cerca de eje de rotación.
- ✚ Resultados: densidad de flujo magnético, tensión de campo, potencial, permeabilidad, energía, inducción propia y mutua, fuerzas magnéticas, momentos rotatorios y otros valores integrales.
- ✚ Deducciones: Se puede usar las fuerzas magnéticas para análisis de tensión en cualquiera parte existente (deducción magneto-estructural). Las perdidas de potencia se puede usar como fuentes de calor para análisis térmico (deducción magneto-térmico)

El módulo de **Análisis Magnético en CC** de **QuickField** está usado para la concepción y análisis de mecanismos como solenoides, motores eléctricos, pantallas magnéticas, magnetos permanentes etc.

#### **Características:**

- ✚ Materiales: Permeabilidad lineal y no-lineal.
- ✚ Edición de las curvas de B-H.
- ✚ Magnetos permanentes con curvas de magnetización lineales y no-lineales.
- ✚ Superconductores.
- ✚ Corrientes distribuidas y concentradas.

- ✚ Condiciones límites de Dirichlet y Neumann.
- ✚ Funciones especiales de aproximación para formulación asimétrica que dan una exactitud alta cerca de eje de rotación.
- ✚ Resultados: densidad de flujo magnético, tensión de campo, potencial, permeabilidad, energía, inducción propia y mutua, fuerzas magnéticas, momentos rotatorios y otros valores integrales.
- ✚ Deducciones: Se puede usar las fuerzas magnéticas para análisis de tensión en cualquiera parte existente (deducción magneto-estructural).

El módulo de **Análisis Magnético en CA** se puede usar para análisis de corriente turbulenta en el tiempo (harmónico). Para una frecuencia dada el módulo puede analizar el campo magnético creado por las corrientes alternas y al contrario las corrientes eléctricas (corrientes turbulentas) inducidas por un campo magnético alterno. Este paquete es ideal para construir transformadores, solenoides, motores eléctricos y muchos otros tipos de inductores.

### Características:

- ✚ Materiales: permeabilidad ortotrópica, conductores de corriente con corriente o voltaje conocidos.
- ✚ Cargas: voltaje, corriente total, fuentes de corriente con fases diferentes, densidad de corriente.
- ✚ Condiciones límites de Dirichlet y Neuman.
- ✚ Superconductores.
- ✚ Resultados: potencial magnético, densidad de corriente, voltaje, densidad de flujo, tensión de campo, fuerzas, momentos rotatorios, calor en Joule, energía magnética, AC impedancias, inducción propia y mutua y otros valores integrales. La mayoría de valores está presentada en la forma de la fase de amplitud (números complejos) y tiempo mediano, también valores RMS.
- ✚ Deducciones: las fuerzas magnéticas se puede usar para análisis de tensión de cualquier parte existente (deducción magneto-estructural); y pérdidas en fuerza se puede usar como fuentes de calor para análisis térmico (deducción magneto-térmica).

El módulo **Electrostático** se puede usar para analizar y construir una variedad de sistemas de capacidad eléctrica tales como fusibles, líneas de transmisión y otros.

### Características:

- ✚ Permeabilidad anisotrópica.
- ✚ Cargas concentradas y distribuidas.
- ✚ Conductores flotantes.
- ✚ Condiciones límites de Dirichlet y Neuman.
- ✚ Resultados: voltaje, campo eléctrico, descarga eléctrica, capacidad de resistencia, gradientes eléctricos, fuerzas, momentos rotatorios y otros valores integrales.
- ✚ Deducciones: las fuerzas eléctricas se puede usar análisis de tensión de cualquier parte existente (deducción electro-estructural).

El módulo **AC Conducción** (alterna) puede usarse para analizar el campo eléctrico creado por tensiones aplicadas de forma armónica. El dieléctrico se asume como no-ideal con una conductividad pequeña pero no nula. Generalmente las magnitudes de interés en el análisis de alterna (AC Conducción) son voltajes, corriente activa y reactiva, campos eléctricos, pérdidas por efecto Joule, capacitancias y fuerzas de origen eléctrico.

### Características:

- ✚ Conductibilidad anisotrópica.
- ✚ Permeabilidad anisotrópica.
- ✚ Voltaje y fuentes de densidad de corriente.
- ✚ Condiciones límites de Dirichlet y Neuman.
- ✚ Resultados: voltajes, campos eléctricos, densidades de corriente conductiva y reactiva (desplazamiento), densidad de flujo (desplazamiento eléctrico), pérdidas por efecto Joule, capacitancias propia y mutua, fuerzas, pares, y energía eléctrica.
- ✚ Acoplamientos: las pérdidas de potencia pueden ser usadas como fuentes de calor (calentamiento Joule) para análisis térmico (acoplamiento termo-eléctrico). Las fuerzas de origen eléctrico se

pueden utilizar para análisis de tensiones (acoplamiento electro-estructural).

El módulo de **Transferencia de calor** se puede usar para analizar y construir muchos sistemas eléctricos y mecánicos diferentes.

**Características:**

- ✚ Propiedades no-lineales o anisotrópicas.
- ✚ Fuentes de calor distribuidas y concentradas.
- ✚ Fuentes de calor como función de temperatura.
- ✚ Fuentes de calor generadas por las pérdidas de fuerza eléctrica.
- ✚ Temperatura y flujos de calor.
- ✚ Condiciones límites con elementos de convección/radiación.
- ✚ Resultados: temperatura, flujo de calor, gradientes térmicos, pérdidas de calor en cualquier parte dada y otros valores integrales.
- ✚ Deducciones: las temperaturas resultantes se puede usar para análisis de tensión térmica.

El módulo de **Análisis de tensión** se puede usar para construir y analizar diferentes componentes mecánicos y eléctricos.

**Características:**

- ✚ Presión de plano, tensión de plano, problemas de presión asimétrica.
- ✚ Propiedades anisotrópicas elásticas.
- ✚ Cargas distribuidas y concentradas.
- ✚ Presiones térmicas, fuerzas magnéticas y eléctricas.
- ✚ Diferentes condiciones de apoyo.
- ✚ Resultados: descargas, componentes de presión, presiones principales, Von Mises, Tresca, Mohr-Coulomb, Druker-Prager y criterio de Hill.

### **A.1.2 Organización básica del QuickField.**

El desarrollo del modelo consta de tres fases:

- ✚ Descripción Geométrica.
- ✚ Definición de propiedades, fuentes de campo y condiciones de límite.
- ✚ Generación de la malla.

Para describir el modelo geométrico, se definen vértices y los márgenes que limiten todas las subregiones, teniendo diferentes propiedades físicas. Pueden crearse vértices y márgenes; mover, copiar y borrar objetos de alguna geometría.

Definición de propiedades, fuentes y condiciones de límites por medio de asignaturas de etiquetas a los objetos de la geometría.

Hay dos opciones disponibles por crear la malla del elemento finito por el modelo:

- ✚ Método totalmente automatizado que genera una malla suave con una densidad basada en dimensiones de las regiones y tamaños de detalles de la geometría. Esta opción no requiere nada de información del usuario.
- ✚ El segundo método deja que se escoja la densidad de la malla. En este caso se necesita definir el valor del espacio de los vértices a alguna opción. Los valores del espacio de los otros vértices se calculan automáticamente para hacer la distribución de la malla suave.

### **A.1.3 Como crear al modelo.**

**Paso 1.- Creación del Modelo Geométrico:** El modelo geométrico se genera por AutoCAD u otros CAD, En el menú de archivo se da guardar con el nombre deseado y con la extensión DXF. De esta manera QuickField puede importar la geometría generada por AutoCAD con la extensión DXF.

**Paso 2.- Creación del Nuevo Problema:** Para crear un nuevo problema, En el menú de archivo del QuickField, se selecciona new y se selecciona QuickField problem. Ahí se seda el nombre del problema y se selecciona que tipo de problema se resolverá y las unidades a trabajar.

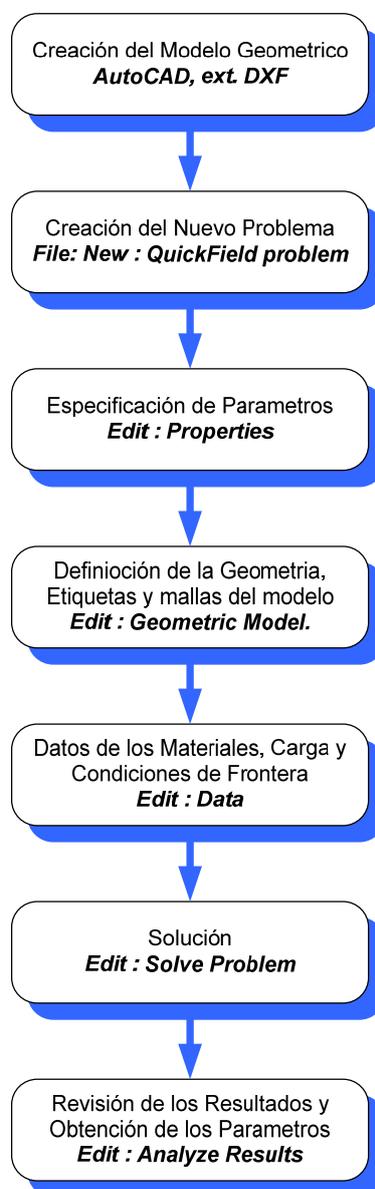
**Paso 3.- Especificación de los parámetros del Problema:** En el menú de Edit seleccionaremos Properties, donde designaremos que clase de modelo y que precisión se requiere en la solución del problema (nivel de precisión alto).

**Paso 4.- Definición de la geometría, etiquetas y mallas del modelo:** En el menú de Edit se selecciona Geometry Model, aquí es donde se importa el modelo geométrico de AutoCAD, se crea las etiquetas y la malla del modelo.

**Paso 5.- Datos de los materiales, carga y condiciones de frontera:** Con la ayuda de las etiquetas generadas anteriormente, se ingresan los datos del problema para su solución.

**Paso 6.- Solución:** En el menú de Edit se selecciona Solve Problem, el cual nos brindara los resultados con los datos proporcionados.

**Paso 7.- Revisión de Resultados:** En el menú de Edit se selecciona Analyze Results, El Post-processor proporciona varias maneras de resultados: Campo con diferentes colores, valores de campo locales, cantidades integrales, grafica x- y, tablas, tabla y graficas para problemas transitorios.



## A.2 ECUACIÓN DE POISSON.

La ecuación de Poisson se obtiene a partir de la forma puntual de la ley de Gauss,

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1)$$

Puesto que  $\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$  y la relación del gradiente  $\mathbf{E} = -\nabla V$ , se tiene

$$\mathbf{D} = -\varepsilon \nabla V \quad (2)$$

La introducción de (2) en (1) da:

$$\nabla \cdot \nabla V = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (3)$$

Para una región homogénea en la cual  $\varepsilon$  sea constante. La ecuación (3) es la ecuación de Poisson, pero la operación “doble  $\nabla$ ” (divergencia del gradiente) se escribe también como  $\nabla^2$  (nabla cuadrada) y es conocido como el operador Laplaciano. Así pues, la ecuación de Poisson se puede escribir

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (4)$$

En coordenadas rectangulares, La ecuación de Poisson es:

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (5)$$

Donde:  $V$  = Potencial, V

$\rho$  = Densidad volumétrica de carga libre, C/m<sup>3</sup>

$\varepsilon$  = Permitividad del medio, 1/F

Si  $V$  es independiente de  $y$  y  $z$ , (5) se reduce a:

$$\frac{d^2 V}{d x^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (6)$$

La ecuación de Poisson es una ecuación diferencial no homogénea de segundo orden que se aplica a un punto. Partiendo de la teoría de ecuaciones diferenciales, se sabe que debe tener una solución de la siguiente forma:

$$V = \text{solución particular} + \text{solución complementaria}$$

La solución particular debe satisfacer la ecuación no homogénea (5), mientras que la solución complementaria (que contiene dos términos de solución linealmente independiente) debe satisfacer la ecuación homogénea, es decir, la ecuación de Laplace.

### A.3 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL GENERADOR DE IMPULSO CON UNA ETAPA.

En la figura A.3.1 se presenta el circuito equivalente del generador de impulsos considerado una etapa, con los siguientes valores:  $R_1 = 9.29.4 \Omega$ ,  $R_2 = 481 \Omega$ ,  $C_1 = 0.14 \mu\text{F}$ ,  $C_2 = 0.43 \text{ nF}$ .

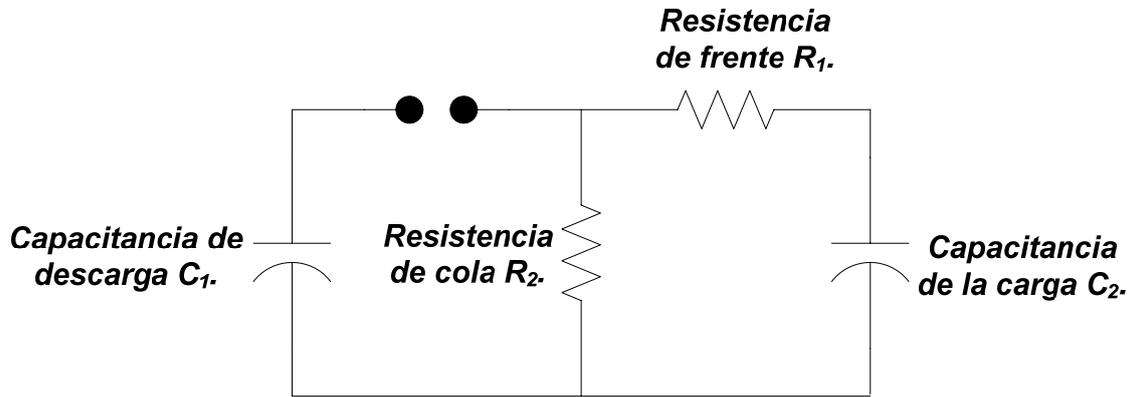


Figura A.3.1 Circuito equivalente del generador de impulso con una etapa.

Resolviendo el circuito, la tensión de salida en  $C_2$  es:

$$V_{(t)} = \frac{V_0}{R_1 C_2 (\alpha_2 - \alpha_1)} (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}) \quad (7)$$

Donde:

$V_0$  = tensión de carga del capacitor  $C_1$ .  
 $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  = raíces de la ecuación característica.

Las raíces se obtienen  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$ :

$$\alpha_1, \alpha_2 = \frac{\left( \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_1} \right)}{2} \pm \sqrt{\left( \frac{\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_1}}{2} \right)^2 - \left( \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \right)} \quad (8)$$

La corriente en el capacitor  $C_2$  es:

$$i_{c_2} = C_2 \frac{dV_{(t)}}{dt} \quad (9)$$

La tensión en  $R_1$  es:

$$V_{R_1} = (i_{c_2}) (R_1) \quad (10)$$

La tensión en  $R_2$  es:

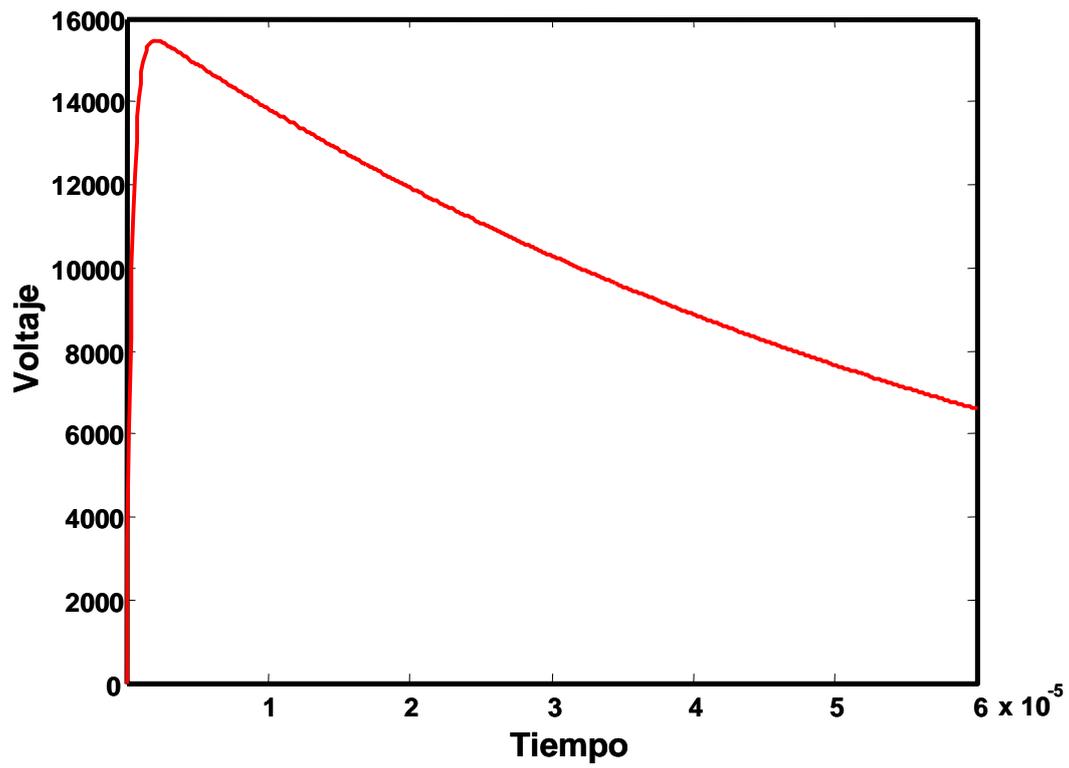
$$V_{R_2} = V_{(t)} + V_{(R_1)} \quad (11)$$

Los cálculos y graficas se realizaron en el programa MatLab, a continuación se presentan el código del programa realizado y los resultados obtenidos.

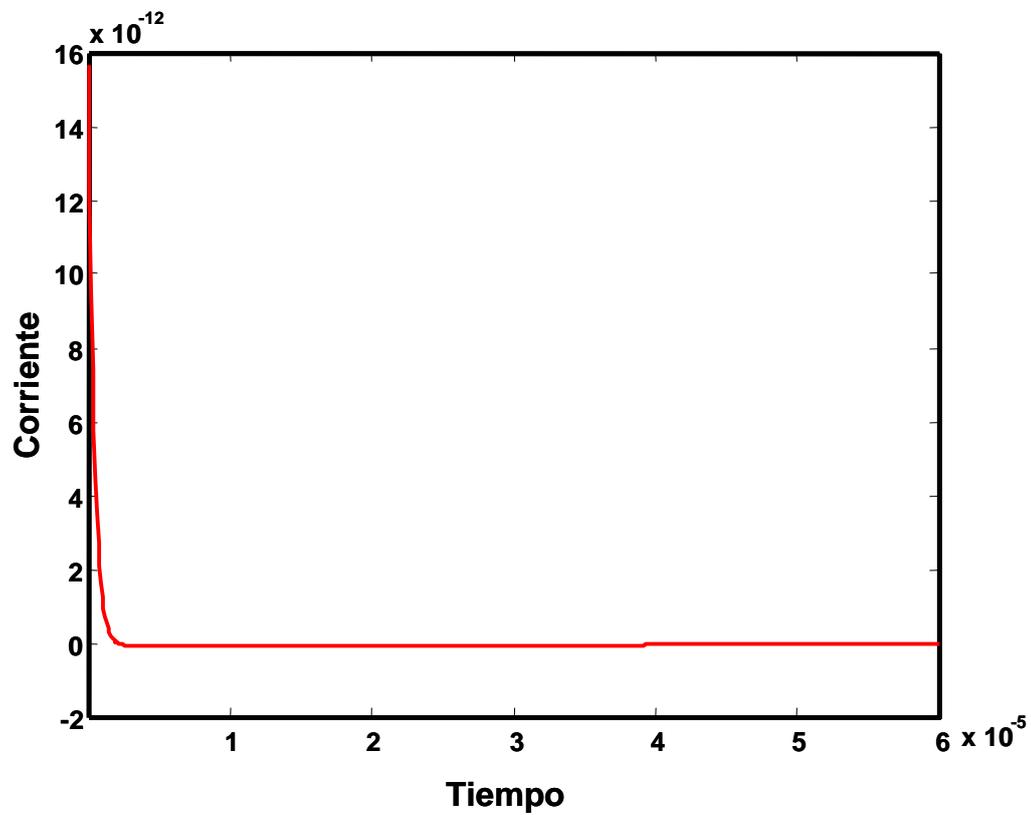
```

clc, clear all
r1=929.4;
r2=481;
c1=0.14*1e-6;
c2=0.437*1e-9;
v0=16.5*1e3;
t=[0:.0000001:60*1e-6];
alf1=((1/(2*r1*c1))+(1/(2*r1*c2))+(1/(2*r2*c1)))-
((1/(2*r1*c1))+(1/(2*r1*c2))+(1/(2*r2*c1)))^2-(1/(r1*c1*r2*c2)))^0.5;
alf2=((1/(2*r1*c1))+(1/(2*r1*c2))+(1/(2*r2*c1)))+((1/(2*r1*c1))+(1/(2*r1*c2))+(1/(
2*r2*c1)))^2-(1/(r1*c1*r2*c2)))^0.5;
Vs=(v0/(r1*c2))*(1/(alf2-alf1))*(exp(-t*alf1)-exp(-t*alf2));
ic2=(c2*(v0/(r1*r2))*(1/(alf2-alf1)))*(-alf1*exp(-t*alf1)+alf2*exp(-t*alf2));
Vr1=(r1*c2*(v0/(r1*c2))*(1/(alf2-alf1)))*(-alf1*exp(-t*alf1)+alf2*exp(-t*alf2));
Vr2=((v0/(r1*c2))*(1/(alf2-alf1))*(exp(-t*alf1)-exp(-
t*alf2)))+(r1*c2*(v0/(r1*c2))*(1/(alf2-alf1)))*(-alf1*exp(-t*alf1)+alf2*exp(-t*alf2));
ir2=Vr2/r2;
figure(1), plot(t, Vs, 'r'),
figure(2), plot(t, ic2, 'r'),
figure(3), plot(t, Vr1, 'r'),
figure(4), plot(t, Vr2, 'r'),
figure(5), plot(t, ir2, 'r'),

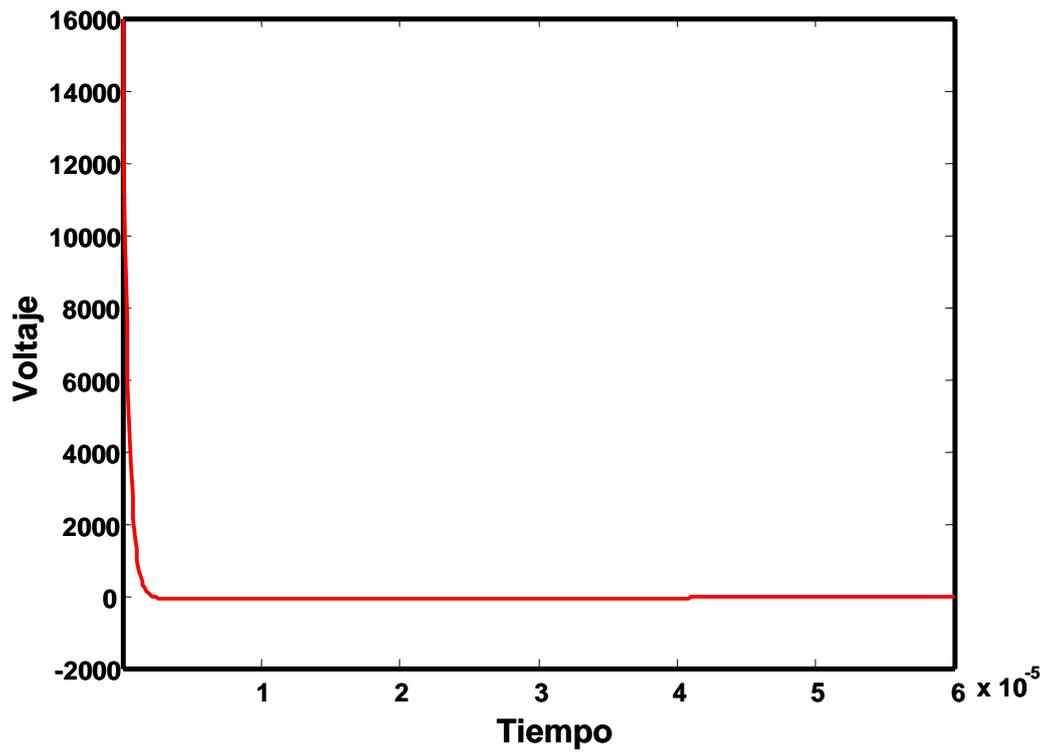
```



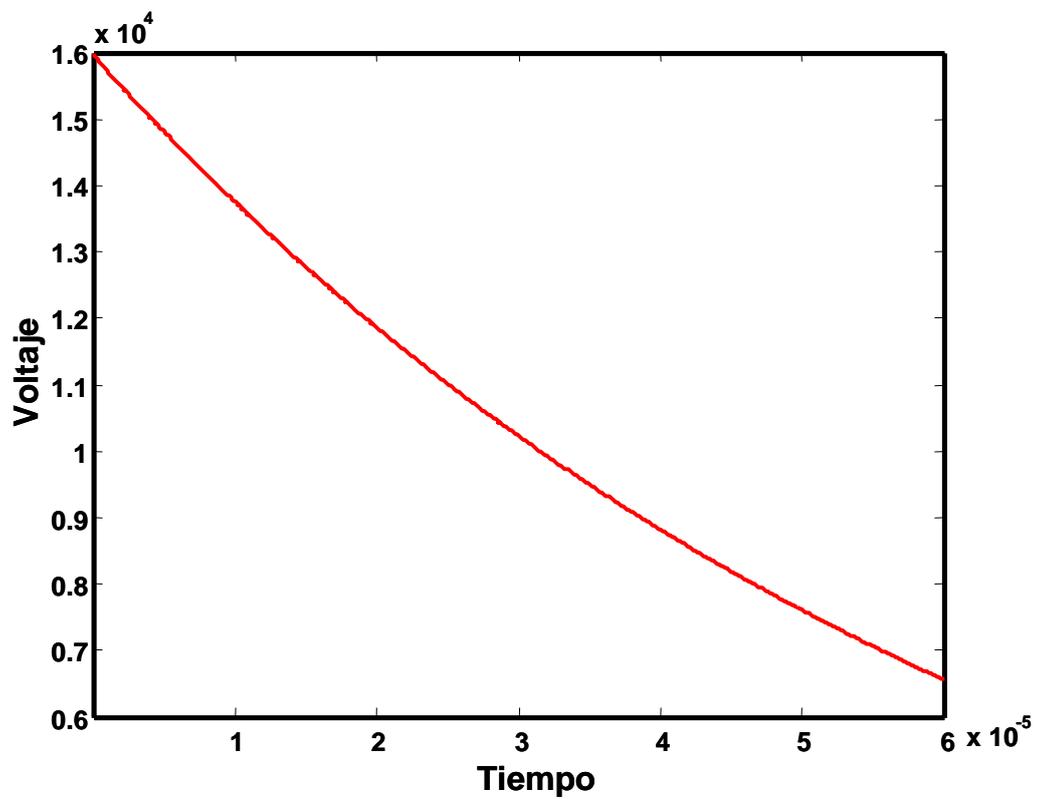
Figure(1), plot(t,Vs,'r'),



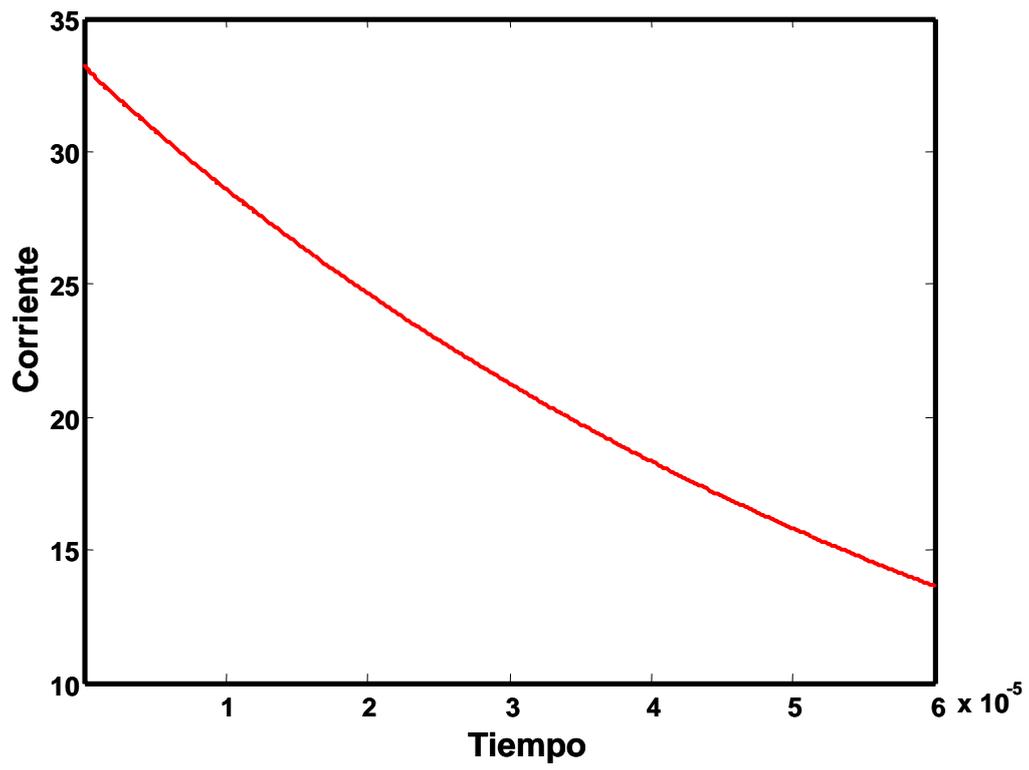
Figure(2), plot(t,ic2,'r'),



Figure(3), *plot(t, Vr1, 'r')*,



Figure(4), *plot(t, Vr2, 'r')*,



*Figure(5), plot(t,ir2,'r'),*

# **PUBLICACIONES**

J. De Mauro M., E. Santos M., E. Fernández H. & V. A. Esquivel G, “Diagnostico del gas SF<sub>6</sub> de la Subestación Eléctrica de 85 kV del complejo de oficinas del centro administrativo de PEMEX corporativo”, IEEE RVP-AI-2007, del 8 al 14 Julio 2007. Acapulco Guerrero, México.

E. Santos M., J. De Mauro M. & C. Tejada M, “Electric Field Distortions in a Discharge gap due to the Presence of a Dielectric Plate”, IEEE RVP-AI-2007, del 8 al 14 Julio 2007. Acapulco Guerrero, México.

J. De Mauro M. & E. Santos M., “Efecto del perfil en la distribución del campo eléctrico en un arreglo de electrodos planos paralelos”, 10° Congreso nacional de ingeniería electromecánica y de sistemas IPN, del 26 al 30 de Noviembre de 2007. México D.F.