

3
24



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

**MEDICION Y ESTUDIO DE LA CARGA ELECTRICA
INYECTADA DURANTE LA DESCARGA ELECTRICA
EN AIRE CON CLAROS DE HASTA 4M. BAJO
IMPULSOS DE MANIOBRA A GRAN ALTITUD.**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
F I S I C O
P R E S E N T A :
MIGUEL ANGEL AGUIRRE LAGUNA



MEXICO, D. F.

1991

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

	PAG.
INTRODUCCION.....	1
CAPITULO 1.....	6
1.1.- Antecedentes de estudios sobre la descarga en aire.	
1.2.- Descripción de la descarga en aire.	
1.3.- Sobrevoltajes que originan la descarga.	
1.4.- Naturaleza estadística del voltaje de descarga.	
1.5.- Factores de corrección por condiciones atmosféricas.	
1.6.- Probabilidad de descarga en una línea de transmisión.	
1.7.- Importancia de medir la carga eléctrica.	
CAPITULO 2.....	23
2.1.- Formación del efecto de corona.	
2.2.- Períodos oscuros.	
2.3.- Crecimiento del líder.	
CAPITULO 3.....	43
3.1.- Instalaciones y equipo utilizado en las pruebas preliminares de medición de la carga eléctrica.	

	PAG.
CAPITULO 4.....	53
4.1.- Principio de funcionamiento del transductor de carga.	
4.2.- Diseño y construcción.	
CAPITULO 5.....	62
5.1.- Evaluación de la carga eléctrica.	
5.2.- Análisis del proceso de evaluación de la carga de conducción.	
5.3.- Pruebas y ensayos de la sonda.	
5.4.- Arreglo experimental.	
5.5.- Procedimiento de prueba.	
5.6.- Presentación de algunos oscilogramas.	
5.7.- Resultados y discusión.	
CAPITULO 6.....	89
6.1.- Transductor para la medición del campo eléctrico.	
6.2.- Principio del funcionamiento de la sonda de campo eléctrico.	
6.3.- Diseño y construcción.	
6.4.- Instalación y equipo propuesto para las pruebas preliminares de medición del campo eléctrico.	
CONCLUSIONES.....	106
APENDICE 1.- Atenuador de acoplamiento al sistema de medición.....	112
APENDICE 2.- Cálculos de capacitancia y campo eléctrico.....	113
REFERENCIAS.....	115

INTRODUCCION

Para cualquier país desarrollado o en vías de desarrollo, son de gran importancia sus sistemas de suministro de energía eléctrica. Actualmente en algunos países existe un constante incremento en la demanda de energía eléctrica para el consumo industrial y público, así como la necesidad de transportar la energía eléctrica a lugares cada vez más distantes de las plantas generadoras, por lo que se ha optado por la instalación de sistemas de mayor voltaje.

En México, debido a su situación orográfica, se requiere de la instalación de líneas de transmisión de alto voltaje en grandes altitudes sobre el nivel del mar.

El problema básico que se presenta en el diseño de líneas de transmisión y subestaciones de alto voltaje en grandes altitudes, es que el comportamiento del aislamiento está aún en proceso de estudio.

Para su solución se requiere conocer el comportamiento del aislamiento realizando pruebas experimentales con configuraciones y equipos básicos en estaciones de prueba a gran altitud.

Durante más de un siglo el fenómeno de la descarga ha sido objeto de investigación. A pesar del tiempo dedicado a su estudio y debido a su complejidad, todavía las distancias de aislamientos en aire para altos voltajes se determinan por fórmulas empíricas, pero aún se siguen presentando problemas por la falta de un conocimiento cualitativo y cuantitativo más completo de la influencia de las

condiciones atmosféricas y de las formas geométricas de los electrodos sobre los parámetros más relevantes que caracterizan a la descarga.

En estudios convencionales del dimensionamiento de aislamientos la ingeniería eléctrica tradicionalmente considera solo parámetros externos de la descarga, es decir, la forma del impulso, el valor del voltaje disruptivo U_B , el valor de soporte o de aguante U_W y el tiempo de ruptura T_B (tiempo de duración de la descarga), pero no son suficientes, ya que se requiere conocer el origen de otras características inherentes al fenómeno, lo cual implica un estudio más científico de los procesos básicos involucrados en la descarga así como de otras cantidades físicas que pudiesen ser las causantes directas de cambios en el desarrollo del fenómeno.

En base a la problemática anterior la Comisión Federal de Electricidad ha desarrollado dos instalaciones para llevar a cabo trabajos experimentales con la intención de mejorar los diseños de aislamientos para grandes altitudes. Estas instalaciones se han construido a diferentes altitudes. Uno de estos lugares es el Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México en Irapuato, Guanajuato, que se encuentra a una altitud de 1710 m. y el otro se localiza en Topilejo, Estado de México, a una altitud de 2930. De tal manera que en México se han creado las condiciones y facilidades para desarrollar investigación sobre este tema.

Las principales cantidades físicas que se analizan en ésta tesis son: la carga eléctrica Q que es inyectada durante el desarrollo de la descarga, el campo eléctrico E que se genera por la presencia de la

carga y la longitud de la descarga guía, conocida como líder.

Estas magnitudes se consideran actualmente parámetros importantes desde dos puntos de vista; el de descripción y explicación científica del fenómeno de la descarga y al mismo tiempo, el de la aplicación práctica en la ingeniería eléctrica de líneas de transmisión y subestaciones para alto voltaje.

El motivo de la realización de este trabajo es contribuir al estudio del mecanismo físico del desarrollo de la descarga eléctrica en aire a densidad relativa reducida y en grandes claros, para lograr este objetivo se han construido dos sondas, una para la medición de la carga eléctrica en el electrodo punta de una configuración punta-plano y la otra para la medición del campo eléctrico en el electrodo plano de la misma configuración, ambas sondas fueron diseñadas para incorporarse a un sistema de medición con fibra óptica.

En el contenido de esta tesis se presentan los diseños, circuitos y construcción de las sondas, además, los conceptos físicos en que se basa su funcionamiento y las pruebas preliminares de medición de carga.

Las pruebas experimentales han sido realizadas en las instalaciones exteriores del Departamento de Alta Tensión del Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México. (en Irapuato)

En el campo de la ingeniería eléctrica de altos voltajes existen varios temas que no han sido estudiados completamente, esto se debe a que para la realización de investigación se requiere de equipo pesado

y de aparatos electrónicos muy costosos que en su mayoría es necesario importarlos, por lo que en México no existía hasta hace unos años la posibilidad de desarrollar investigación en este campo.

Las principales causas de la complejidad de los problemas asociados con altos voltajes, es la naturaleza aleatoria de la descarga disruptiva y las dificultades que estos presentan para medir algunas características, como por ejemplo la carga eléctrica o el campo eléctrico, especialmente cuando su distribución espacial es no-uniforme.

Algunas dificultades que se presentaron en este tipo de trabajo fueron, primeramente; la determinación de las características eléctricas de los transductores y la adaptación de los mismos a los electrodos de la configuración punta-plano, la fuerte interferencia electromagnética que se origina durante la descarga y el diseño de blindajes, así como problemas de montaje de los circuitos debido a las magnitudes de los aparatos de experimentación.

El transductor de medición de carga eléctrica en electrodos energizados puede tener varias aplicaciones desde el punto de vista tecnológico, algunas de ellas es, por ejemplo, la determinación de magnitudes de voltaje con baja probabilidad de descarga para líneas de transmisión, el cual es un proyecto teórico que actualmente esta en proceso de investigación en algunos países. Además de ampliar los conocimientos del desarrollo de la descarga disruptiva, otra aplicación es la detección de la carga eléctrica con el fin de sincronizar el disparo de una cámara fotográfica ultrarápida con

osciloscopio integrado conocida como convertidor de imágenes.

Por otra parte el tipo de diseño del transductor (o sonda) permite utilizarse también para la medición de campo eléctrico en electrodos energizados, haciendo algunas modificaciones en las conexiones del transductor e incorporando una plaquita metálica, aislada a la superficie del electrodo.

CAPITULO 1

1.1.- Antecedentes de estudios sobre la descarga en aire.

Los estudios del fenómeno de la descarga eléctrica en aire se remontan hasta fines del siglo XIX, desde entonces el número de trabajos en este tema se ha incrementado, motivado principalmente, más por inquietudes tecnológicas que científicas. De las nuevas necesidades y en base a los logros obtenidos ha surgido el interés por desarrollar trabajos de investigación para analizar y describir las diferentes etapas de la formación de la descarga en base a los procesos físicos .

En los últimos años éste interés ha aumentado como consecuencia del constante incremento en la demanda de electricidad, la construcción de nuevas plantas generadoras y el uso de líneas de transmisión de mayor voltaje, éstas y otras cuestiones han favorecido el interés sobre el estudio de la descarga.

En consideración a las premisas anteriores se han creado grupos y centros de investigación en varios países encausados al estudio de la descarga, algunos de los que más han sobresalido son; Canada, E.U., Inglaterra, Francia e Italia, en los cuales se cuenta con mayores recursos y mejores técnicas de experimentación para efectuar estudios más completos y precisos de la descarga.

Como resultado de los perfeccionamientos de las técnicas de medición, el grupo Les Renardieres de Francia ha llevado a cabo

estudios detallados del fenómeno individual, utilizando para ello una configuración punta-plano con distancias de separación de los electrodos hasta de 10m sometida a impulsos de voltaje (1).

En 1971, dicho grupo realizó una investigación sobre la física de la descarga en grandes intervalos de aire bajo impulsos de voltaje principalmente de polaridad positiva con tiempos de cresta entre algunas decenas y algunos cientos de microsegundos, gran parte de los parámetros de la descarga se evaluaron junto con su dispersión estadística. Durante esta etapa de investigación se hicieron mediciones sobre el comportamiento de la descarga en relación a las condiciones ambientales y geométricas en que se produce; para esto, las pruebas fueron sistemáticamente encausadas a una sola configuración, que fué la punta-plano.

También se hicieron mediciones espectroscópicas de las condiciones que se generan en la región del efecto corona y durante la fase del líder, ésta técnica fué aplicada a varios intervalos con el fin de obtener información sobre los estados de ionización, gradiente de voltaje y temperatura.

Después de esas mediciones surgieron muchas preguntas, varias de ellas quedando sin respuesta, así como nuevos e interesantes problemas, lo cual inició un período de pruebas adicional en 1973.

Generalmente Los Renardieres contribuyeron a obtener resultados cuantitativos en aquellas áreas donde solamente se había logrado información cualitativa, lo cual se logró concentrando los aparatos de medición en diferentes fases de la descarga, para registrar durante la

aplicación de un mismo impulso de voltaje el mayor número de parámetros de interés como fuese posible.

La segunda etapa de investigación se caracterizó por el perfeccionamiento de las técnicas de medición, algunas de ellas fueron, la habilidad para medir variaciones rápidas de corriente, así como la medición de la intensidad del campo eléctrico y la magnitud de la carga inyectada en los electrodos. Otro avance fué la extensión del estudio de la descarga a nuevas configuraciones geométricas como; esfera-plano, semiesfera-plano, cono-plano, punta-punta, etc. (4)(1)

1.2.- Descripción de la descarga en aire bajo impulsos de maniobra.

Cuando se tienen dos electrodos separados una cierta distancia en un medio gaseoso como el aire y se aplica una diferencia de potencial en forma impulsiva, como por ejemplo un impulso de maniobra, se produce una descarga disruptiva si la magnitud del voltaje aplicado es la suficientemente grande para vencer la resistencia dieléctrica del aire.

El campo eléctrico que se produce por la aplicación del impulso de voltaje de maniobra llega a ser tan intenso como para hacer que los electrones o iones que existen en el aire adquieran una energía cinética capaz de ionizar los átomos y moléculas del aire, como resultado de sus choques con ellas. De esta forma se origina una serie de procesos de ionización múltiple y fotoionización, mediante los cuales se empiezan a producir continuamente iones y electrones.

La descarga disruptiva que se produce, se manifiesta como una franja luminosa y espontánea que une ambos electrodos, el fenómeno luminoso es acompañado simultáneamente por un ruido que se asemeja al ruido de un disparo. La duración de la descarga es de algunas centenas de microsegundos.

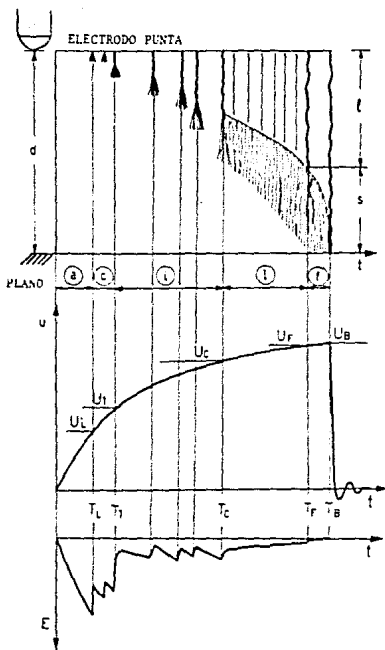
Con el fin de definir los voltajes e intervalos de tiempo en que ocurren las diferentes etapas de la descarga, se presenta una descripción simplificada del fenómeno luminoso con relación al voltaje aplicado y el campo eléctrico (1), además se mencionan otras características que se utilizarán más adelante en este trabajo.

De una fotografía captada por una cámara ultrarápida (image converter) se ha sacado la figura 1a) en la cual se muestra el desarrollo progresivo de una descarga disruptiva positiva con todas sus etapas, la descarga fue producida en una configuración punta-plano. La figura 1b) es un oscilograma captado por un osciloscopio de impulsos, en el que aparece la forma de onda del impulso de voltaje, con sus valores característicos, cuando se presenta la descarga.

En la figura 1c) se presenta el campo eléctrico registrado en el extremo del electrodo punta. Las tres gráficas están en función de la misma base de tiempo.

Etapa de ausencia de la descarga.

Esta primera etapa se caracteriza por un fuerte incremento en el campo eléctrico desde el inicio de la aplicación del impulso de voltaje, mientras que la cámara fotográfica no registra luminosidad alguna.



d : distancia entre electrodos
 l : longitud del líder
 a : etapa de ausencia del fenómeno
 c : etapa de corona (períodos oscuros primarios)
 i : etapa del líder (períodos oscuros secundarios)
 l : etapa de propagación continua del líder.
 f : etapa del salto final.

T_i, U_i : inicio de corona.
 T_l, U_l : inicio del líder.
 T_c, U_c : avance continuo del líder.
 T_f, U_f : inicio del salto final.
 T_b, U_b : fin de la descarga.

c) E : Campo eléctrico en la punta
 t : Tiempo.

Fig.1.1.-Desarrollo de la descarga disruptiva producida por un impulso de maniobra. 1a) Descarga luminosa, 1b) Forma de onda del voltaje aplicado, 1c) Campo eléctrico en el extremo del electrodo energizado (punta).

Etapa de corona.

Esta etapa se inicia en el instante T_i en el cual el campo eléctrico alcanza un valor crítico y es cuando aparece el fenómeno de corona en el electrodo punta. Durante esta etapa se puede presentar uno o varios periodos oscuros primarios, por lo que a ésta etapa también se le conoce como etapa de periodos oscuros primarios. Un periodo oscuro primario consiste en una interrupción de la descarga luminosa, o sea que el fenómeno de corona desaparece y conforme va aumentando el voltaje impulsivo vuelve a suceder una segunda reiluminación de la corona. En el caso de la figura 1a) hay dos periodos oscuros primarios.

Etapa del líder.

La etapa de periodos oscuros primarios termina cuando aparece al ojo una franja o canal brillante, a esta franja se le ha llamado "líder" por la razón de que "guía" la trayectoria de la descarga hacia el electrodo plano. Al tiempo t_i y el voltaje V_i en los que ocurre, son el tiempo de inicio del líder y el voltaje de inicio del líder, respectivamente. Después de la primera aparición del líder, la descarga puede parar otra vez y un periodo oscuro secundario tiene lugar hasta que ocurre otra reiluminación de la corona pero ahora con un incremento instantaneo de la longitud del líder. Esta nueva ausencia de luminosidad puede ocurrir varias veces, en la fig. 1b) hay cuatro periodos oscuros secundarios.

Etapa del líder continuo.

Cuando el crecimiento de la longitud del líder empieza a ser continuo, la etapa de periodos oscuros secundarios termina y la etapa

del líder continuo comienza. T_c y V_c son respectivamente el tiempo y voltaje del inicio continuo del líder.

Durante toda su propagación, el extremo inferior del líder es precedido por una zona de filamentos de corona (streamer), la longitud de estos filamentos aumenta ligeramente en ésta etapa.

Etapa del salto final.

La etapa del salto final se inicia en el instante T_F cuando la zona de filamentos de corona alcanza a tocar el electrodo plano, a partir del tiempo de inicio del salto final T_F la velocidad de propagación del extremo inferior del líder aumenta exponencialmente y en unos 20 ns alcanza el plano, cortocircuitando los electrodos debido a la alta conductividad del líder y terminando así la descarga.

Las etapas descritas pueden tener diferente duración y los periodos oscuros primarios y secundarios pueden no presentarse, ya que dependen de la forma de onda y de la geometría de los electrodos, o sea que, para que la descarga se produzca, deben presentarse todas las etapas con o sin periodos oscuros primarios y secundarios.

El desarrollo de una descarga puede detenerse en cualquiera de las primeras cuatro etapas, pero cuando el desarrollo de la descarga ha llegado hasta la etapa del salto final, el fenómeno ya no puede parar, de tal manera que la descarga se presenta.

1.3.- Sobrevoltajes que originan la descarga.

Las fallas que se presentan en los sistemas eléctricos de alto voltaje son producidas en su mayoría por sobrevoltajes, estos sobrevoltajes son ocasionados por causas de origen interno, como la apertura y cierre de interruptores, ó por causas de origen externo, como las descargas atmosféricas (rayos).

En un laboratorio de alta tensión es posible representar con buena aproximación estos tipos de sobrevoltajes aplicando impulsos de voltaje, las descargas que ocasionan dichos sobrevoltajes son el objetivo principal de este trabajo.

La formas de onda de los impulsos pueden ser varios: doble exponencial, rampa, compuestos, etc. Debido a que la forma de onda tiene gran influencia sobre la resistencia de los aislamientos a la descarga, para propósitos de pruebas, las formas de onda de impulsos de voltaje de doble exponencial se han estandarizado para representar los dos tipos de sobrevoltajes de falla más comunes, estos son; los impulsos de rayo y de maniobra.

En las pruebas que se realizaron en este trabajo únicamente se aplicaron impulsos de maniobra, ya que se considera que para sistemas eléctricos de extra alta tensión (EAT) con grandes intervalos de aire la tensión más severa es causada por impulsos de maniobra de polaridad positiva.

El impulso de maniobra del tipo doble exponencial normalizado se caracteriza por su tiempo de cresta $T_{cr} = 250 \mu s$ y su tiempo al valor medio $T_m = 2500 \mu s$ (2).

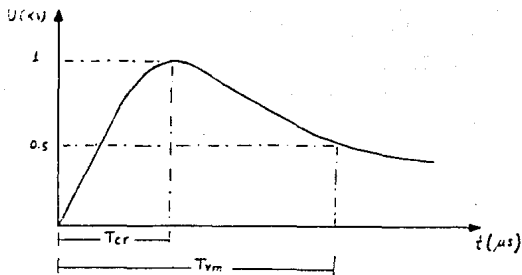


Fig.1.2.- Características de un impulso de maniobra doble exponencial. Donde T_{cr} : tiempo de cresta
 T_{vm} : tiempo al valor medio.

Descarga disruptiva

El término de descarga disruptiva se utiliza cuando se vence la resistencia dieléctrica del aislamiento que se encuentra entre dos electrodos sometidos a una diferencia de potencial. La descarga puentea ó atraviesa completamente el aislante, reduciendo el voltaje entre los electrodos a cero o cercano a cero. El aislamiento puede ser sólido, líquido o gaseoso, o bien, una combinación de éstos.

El oscilograma característico cuando sucede la descarga, se presenta en la figura 1.3, el colapso repentino del voltaje, también llamado "corte", puede ocurrir en el frente, en el pico o en alguna sección de la cola del impulso.

En la misma fig.1.3, se indican pequeñas oscilaciones que se originan por el fenómeno transitorio que se induce al presentarse la descarga.

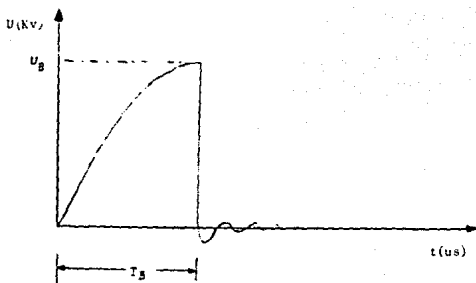


Fig.1.3.- Oscilograma típico de la existencia de descarga.

1.4.- Naturaleza estadística del voltaje de descarga y definición de U_{50} .

En el estudio de la descarga eléctrica en grandes intervalos de aire es necesario hacer mediciones de diferentes magnitudes que caracterizan al fenómeno. Una de estas magnitudes es el voltaje que produce la descarga, el cual es una cantidad estadística, por lo que se aplican procesos y métodos estadísticos para determinar su valor y así obtener información más confiable. Cuando en una configuración electródica se aplica un voltaje, se origina la posibilidad de que ocurra una descarga, de modo que el fenómeno de la descarga debe ser visto como un evento aleatorio, ya que un valor de voltaje que produjo, una descarga y al volverlo a aplicar en las mismas condiciones puede no producir la descarga nuevamente. De tal manera que es necesario asociar una probabilidad de ocurrencia de la descarga a un valor dado de voltaje.

La determinación de valores de voltaje con una cierta probabilidad de producir una descarga, son de gran importancia para el cálculo de distancias de aislamientos y diseño de aislantes.

El voltaje U50 es el voltaje con 50% de probabilidad de producir una descarga disruptiva y depende de varios factores como; la distancia entre electrodos, forma de onda del voltaje aplicado, polaridad, configuración eléctrica y condiciones atmosféricas.

Para la determinación experimental de U50 existen dos métodos; el "Up and down" y el método por etapas o de nivel múltiple. (2)

1.5.- Factores de corrección por condiciones atmosféricas.

La mayor información que se tiene sobre características de operación de equipo eléctrico y de aislamientos para líneas de transmisión proviene principalmente de laboratorios instalados a altitudes cercanas al nivel del mar. Es en estos laboratorios de alta tensión donde se hacen las pruebas de diseño de aislamientos y determinación de los voltajes de operación. De modo que para utilizar el equipo probado en estos laboratorios, en lugares de altitud mayor, es necesario hacer ciertas correcciones, ya que el cambio de altitud implica un cambio en la presión atmosférica y en consecuencia, variaciones en su densidad relativa.

El voltaje que produce la descarga disruptiva en los aislantes externos es fuertemente afectado por las condiciones atmosféricas

prevalcientes, debido a que la densidad y la humedad del aire modifican la resistencia dielectrica del aislante, lo que hace necesario la aplicación de factores de corrección.

Los principales factores de corrección por condiciones atmosféricas son; el factor de corrección debido a la densidad del aire K_d y el factor de corrección por la humedad del aire K_h .

Con la aplicación de factores de corrección es posible calcular el voltaje de ruptura que se obtendría bajo condiciones atmosféricas de referencia. O bien, un voltaje de prueba determinado en condiciones atmosféricas de referencia puede ser convertido a un valor equivalente para condiciones atmosféricas diferentes.

Los problemas que se tienen en este campo consisten en que los factores de corrección por condiciones atmosféricas se determinan por fórmulas y gráficas empíricas obtenidas con pocos datos y por falta de un modelo o teoría que pueda predecir el comportamiento de la descarga en condiciones atmosféricas diferentes a las de referencia (existen normas de prueba que se basan en diferentes condiciones atmosféricas de referencia).

Las normas existentes reflejan esta situación por lo que se revisan periódicamente para incluir las contribuciones de nuevos trabajos.

1.6.- Probabilidad de descarga en una línea de transmisión.

Por razones de confiabilidad en la continuidad del servicio eléctrico, por seguridad y de economía, se requiere que la probabilidad de descarga en una línea de transmisión PLT sea cero o muy cercana a cero. Para asegurar que la PLT- 0, es necesario recurrir a la aplicación de varios métodos de prueba para mejorar y optimizar los diferentes dispositivos eléctricos y mecánicos que componen las líneas de transmisión, como: estructuras, herrajes, torres, cadenas aislantes, cables, soportes, etc., ya que además de estar expuestos a las diferentes sobretensiones externas e internas y de las condiciones atmosféricas, que como se dijo ya antes, pueden cambiar la resistencia de los aislamientos a la descarga, también se encuentran a merced de otros factores que pueden favorecer en un momento dado la ocurrencia de descargas disruptivas. Algunos de estos factores son la lluvia, el viento, incendios, contaminación ambiental, etc.

De tal manera que determinar un valor de baja probabilidad de descarga en el sistema completo de una línea de transmisión no es nada trivial, ya que se requiere tomar en cuenta todos los factores que intervienen, lo cual implica determinar primeramente la probabilidad de falla de dispositivos individualmente, y después en conjunto. Un ejemplo es el cálculo de la probabilidad de un aislamiento múltiple es decir, de un conjunto de aisladores iguales. Así pues, la probabilidad de descarga en una línea de transmisión depende de la probabilidad de varios eventos.

1.7.- Importancia de medir la carga eléctrica.

La importancia de la medición de la carga eléctrica que es inyectada durante el desarrollo de una descarga en aire, radica principalmente en dos inquietudes; una de carácter científico que consiste en conocer y explicar el fenómeno de la descarga eléctrica en base a los procesos básicos de la física, y la otra consistente en la necesidad de resolver problemas prácticos en el campo de altos voltajes. Uno de los principales problemas de aplicación práctica radica en la medición de la carga eléctrica con el fin de determinar valores de voltaje con baja probabilidad de descarga para líneas de transmisión o cualquier otro sistema de alto voltaje que requiera de alta precisión de la probabilidad de descarga. Esta posible aplicación se basa en la siguiente argumentación.

Actualmente el diseño de aislamientos se hace siguiendo una aproximación estadística y por otra parte cuando someten a prueba aislamientos que involucran una gran cantidad de aislantes, el rango de probabilidades de descarga de interés por cada aislante es del orden de 10^{-4} y 10^{-5} . Utilizando una aproximación empírica, la curva de probabilidad de descarga en este rango solamente puede ser obtenida por extrapolación de los resultados obtenidos de valores con mayor probabilidad de descarga.

La aproximación empírica consiste en la aplicación de un gran número de impulsos de voltaje con varios valores de voltaje de cresta cercanos al valor buscado y de esta forma encontrar las mejores estimaciones de los parámetros de un tipo de función de probabilidad

prefijada para representar la dependencia de la probabilidad de descarga con el voltaje aplicado.

Pero para determinar el voltaje correspondiente a una baja probabilidad de descarga con un intervalo de confianza aceptable utilizando el método anterior, es necesario realizar un gran número de pruebas sobre un mismo objeto o de lo contrario probar un gran número de objetos iguales en paralelo. Las dificultades que se presentan en el primer caso es la seguridad de que el objeto de prueba permanezca siendo el mismo durante el largo tiempo de prueba, esto es, refiriéndose a sus características eléctricas además de las condiciones de prueba, en el segundo caso es muy difícil que todos los objetos de prueba sean realmente iguales, además de que no es práctico.

Para resolver estas dificultades se han propuesto una serie de métodos de prueba con configuraciones básicas, además de un estudio más científico del problema.

Una de las proposiciones consiste en resolver el problema desde otro punto de vista, el cual se basa en la posibilidad de relacionar una cantidad medible, involucrada en el proceso de la descarga. La magnitud que podría estar relacionada a la probabilidad de descarga es la carga eléctrica generada sobre el electrodo cargado positivamente durante el fenómeno de la descarga y suponer que esta carga excede un valor crítico.

La carga inyectada es una función del tiempo y consta de dos partes; la que se forma debido a una componente capacitiva pura, y la que se forma debido al efecto de corona y al fenómeno de propagación

del líder. La primera no es de interés para el proceso de descarga y puede ser relativamente fácil evaluarla y separarla de la carga total medida. La segunda alcanza un valor máximo cuando el impulso es soportado, la cual se puede considerar como la carga inyectada en caso de aguante. Cuando el impulso produce una descarga disruptiva la carga es muy grande y su valor no tiene nada que ver con los procesos físicos descritos, ya que entonces depende de la carga almacenada en el generador de impulsos. Sin embargo, en este último caso es relativamente fácil determinar en el oscilograma el instante en el cual empieza la etapa del salto final y suponer como carga inyectada en caso de aguante el valor de carga alcanzado en ese instante.

Estos dos tipos de carga podrían tener un significado físico y estadístico diferente, y en tal caso tendrían que ser sometidos a diferente tipo de análisis. (3)

Se espera que los trabajos futuros basados en ésta técnica de estudio guíe a interesantes descubrimientos sobre el proceso de la descarga.

La aplicación práctica de ésta técnica tiene la ventaja de que además de estar encausada a la determinación de valores de voltaje de baja probabilidad, al mismo tiempo permita ampliar los conocimientos sobre el desarrollo de la descarga disruptiva. Otra ventaja consiste en obtener más información con la misma cantidad de pruebas.

Dentro de las aplicaciones prácticas de la medición de la carga, está también la sincronización de disparo de una cámara ultrarápida por medio de la detección de la carga.

Otro aspecto importante es que las mediciones de carga eléctrica al ser realizadas en un lugar de gran altitud, pueden aportar mayor información sobre la dependencia del desarrollo de la descarga con las condiciones atmosféricas (densidad y humedad del aire), y hacer comparaciones con trabajos realizados a menor altitud, y en consecuencia contribuir a mejorar los factores de corrección.

Las diferentes variaciones de densidad relativa influyen en el voltaje de descarga de una configuración, lo cual puede reflejarse en una variación de la carga inyectada. En México existen muchas regiones montañosas, y hasta antes de este trabajo no se habían iniciado estudios de la carga inyectada a gran altitud.

CAPITULO 2

2.1.- Formación del efecto de corona.

Cuando se aplica un impulso de voltaje en una configuración punta-plano y alcanza el valor U_i , el campo eléctrico en la región cercana a la punta adquiere valores bastante altos para causar la formación de un cierto número de streamers, los cuales se propagan con una velocidad del orden de 10^5 cm/ms.

En una fotografía con escala de tiempo integrada, los streamers aparecen como filamentos luminosos formando ramificaciones; las investigaciones con fotomultiplicadores han mostrado que la luminosidad está principalmente concentrada en el extremo del streamer. Durante el efecto de corona un pulso de corriente fluye en el circuito y el campo eléctrico sobre la superficie del electrodo se reduce repentinamente. Este efecto se explica con la teoría del streamer.

Un electrón libre es acelerado por el campo eléctrico y al chocar con las moléculas neutras del aire las ioniza, creando nuevos electrones libres a una cierta razón α por unidad de longitud, formando así una avalancha de electrones que al llegar al electrodo tiene en su extremo un cierto número de electrones dado por la siguiente expresión:

$$N = \exp \left[\int_{r_1}^{r_2} (\alpha - \eta) dx \right] \quad \text{ec.2.1}$$

donde r_1 y r_2 son las coordenadas de los puntos de inicio y final y η es el coeficiente de enlace. En aire a presión atmosférica la multiplicación de electrones puede existir solamente donde el campo es mayor que 26KV/cm porque solo en este caso α es mayor que η . Los nuevos electrones que se forman se mueven rápidamente al electrodo permitiendo la formación de una carga espacial de iones positivos.

Si el campo eléctrico es bastante grande, la avalancha que llega al electrodo puede alcanzar un tamaño crítico (aproximadamente 10^8 electrones) lo cual permite formar un streamers por efecto de la carga espacial positiva. Como esquemáticamente se muestra en la figura 2.1, la formación del streamers es promovida por una segunda avalancha iniciada por electrones, los cuales son principalmente producidos por fotoionización. Bajo la acción del campo total, estas avalanchas sucesivas alcanzan la carga espacial positiva, neutralizandola y permitiendo la formación de otra carga positiva más pequeña y más lejos del electrodo. Con tal mecanismo una carga positiva se aleja etapa por etapa del electrodo, dejando detrás de ella un filamento parcialmente ionizado.

Si se conoce la distribución del campo y $(\alpha - \eta)$ en todos los puntos, es posible calcular el valor de voltaje que causa la primera avalancha que produce la cantidad crítica de electrones y se considera como voltaje mínimo de inicio de corona.

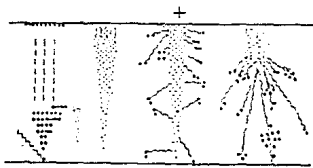


fig.2.1.- Representación esquemática de la formación de un streamer.

Aunque el voltaje de inicio de corona puede ser calculado con una buena precisión, es difícil determinar cuantitativamente el camino por el cual se propaga el streamer. El filamento y principalmente la carga espacial positiva en su cabeza, modifican la distribución del campo de modo que avalanchas secundarias se desarrollan en un campo que depende en gran parte de las características de la carga espacial. Esto se muestra claramente por el hecho de que un streamer, una vez que está formado, es capaz de propagarse muy lejos del electrodo donde el campo debido al voltaje aplicado tiene un valor muy por debajo de 26KV/cm. Dawson y Winn mostraron la posibilidad de propagación de un streamer hasta un cierto punto en una región de campo cero.

El cálculo del campo cerca de la cabeza del streamer puede obtenerse solamente por medio de varias simplificaciones e hipótesis acerca del tamaño y el valor de la carga espacial.

Por otra parte, la posibilidad de que una o más avalanchas secundarias produzcan la cantidad suficiente de electrones para

causar una etapa de aumento de la longitud del streamer, depende del número y posición de los fotoelectrones producidos adelante del extremo del streamer, durante la formación de la etapa anterior.

Si llamamos N al número de fotones producidos durante la formación de una etapa y c la probabilidad de que uno de ellos produzca un electrón libre en la posición correcta para iniciar una avalancha de tamaño conveniente; un criterio para la propagación de un streamer podría ser :

$$cN \geq 1 \quad \text{ec.2.2}$$

Esto significa que el proceso que causa una etapa de aumento de la longitud del streamer, produce también las condiciones para la siguiente etapa. Como el número de fotones producidos por una avalancha, que se mueven frente al extremo del streamer desde r_1 a r_2 , es proporcional, al número de los nuevos iones positivos creados, la condición de la ec.2.2 se convierte en :

$$c \tau \exp \left[\int_{r_1}^{r_2} (\alpha - \eta) dx \right] = 1 \quad \text{ec.2.3}$$

La ecuación 2.3 no puede usarse en aplicaciones prácticas por la dificultad para determinar los valores de c y τ , porque es casi imposible calcular el desarrollo de varias avalanchas en una misma región y que podrían iniciar en diferentes instantes y empesar desde diferentes puntos al frente del extremo del streamer

Recientemente se ha propuesto un modelo el cual considera esas dificultades y permite calcular la propagación de un streamer con resultados satisfactorios. El modelo consiste en substituir el efecto de varias avalanchas secundarias por solamente una avalancha equivalente como se muestra esquemáticamente en la fig.2.2.

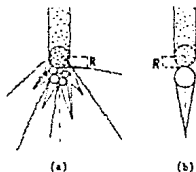


fig.2.2.-Representación esquemática del mecanismo de propagación de un streamer.a).-Serie de avalanchas nuevas.b).-Modelo simplificado con una sola avalancha equivalente.

La serie de nuevas avalanchas (fig.2.2a) ó la avalancha equivalente (fig.2.2b) originan que el extremo del streamer avance un tramo el cual es dos veces el radio del extremo del streamer. Durante la formación de la serie de avalanchas los electrones pierden una cierta cantidad de energía W_i ya sea por excitación, ionización, enlace, etc. Esta energía es parcialmente reemplazada por el trabajo W_r hecho por el campo eléctrico aplicado sobre las cargas en movimiento y parcialmente por la variación ΔW_p en la energía potencial del extremo del streamer. El equilibrio de estos cambios de energía se pueden expresar como:

$$W_i = W_r + \Delta W_p \quad \text{ec.2.4}$$

y la avalancha equivalente se calcula de modo que satisfaga la ecuación 2.4.

Etapa por etapa el crecimiento de un streamer puede calcularse junto con sus características. Los resultados obtenidos con este modelo concuerdan bastante con los resultados experimentales de la longitud del streamer fig.2.3.y de la forma de la corriente asociada con el desarrollo del streamer fig.2.4.

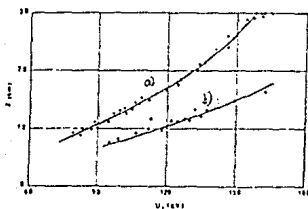


Fig.2.3.-Gráfica de la longitud del streamer contra el voltaje de inicio de corona en intervalos de 30 cm (a) y 150 cm (b).

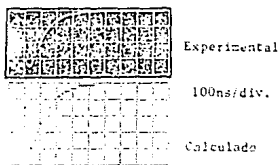


fig.2.4.-Oscilograma experimental y calculado de la corriente de un streamer, en un intervalo de 150 cm.

En un desarrollo posterior las ramificaciones de un streamer fué estudiado tomando en cuenta la posibilidad de dos avalanchas equivalentes desarrollandose simultaneamente.

Desafortunadamente un modelo para el desarrollo de un streamer es solamente un pequeño avance. Aun cuando se considera una pequeña región, el número de streamers que se forman en el inicio de corona es grande, de modo que para construir un modelo que represente completamente el fenómeno de corona es necesario estudiar la influencia de dos o mas streamers que se desarrollan uno cerca del otro. (5)

Considerando las mismas condiciones experimentales, el valor del voltaje de inicio de corona no es constante ya que difiere de la aplicación de un voltaje a otro, pero se distribuye en un cierto rango de valores de voltaje como se muestra en la fig.2.5. Por otra parte cuando la duración del frente del impulso es variado, el valor promedio del voltaje de inicio cambia, fig. 2.6, mientras que el valor mínimo es siempre el mismo y depende del radio de curvatura del electrodo.

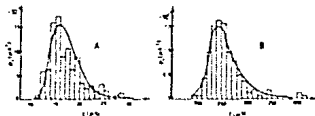


fig.2.5.-Distribuciones calculadas y experimentales de la probabilidad del voltaje de inicio de corona. a) Intervalo de 10m; extremo cónico con 1cm de radio de curvatura, 500/1000. b) Intervalo de 2m, extremo hemisférico de 30cm de radio, 350/1000.

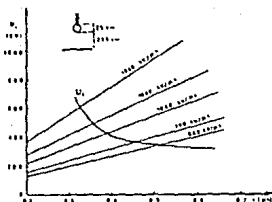


fig.2.6.-Voltaje promedio de inicio de corona en función de la razón de rizo del impulso de voltaje.

Este aspecto muestra que para que ocurra la corona no es suficiente que el voltaje alcance el valor mínimo de inicio, es necesario también que en ese instante un electrón libre este presente en el lugar conveniente para iniciar una avalancha primaria de tamaño crítico.

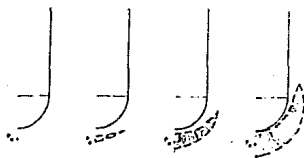
En el voltaje mínimo de inicio hay solamente un punto desde el cual un electrón puede iniciar dicha avalancha. Como el voltaje aumenta, la región con alto campo eléctrico se extiende de modo que es posible definir un volumen donde en cualquier punto de éste puede iniciarse una avalancha de tamaño más grande que el crítico. Para un electrodo de geometría dada, este volumen V puede calcularse en función del voltaje, fig. 2.7, y en función del tiempo si se conoce la forma del impulso. La función $V(t)$ dependerá de la razón de rizo del voltaje y de la distribución del campo eléctrico.

Si se producen electrones libres por algun proceso en una razón de $\zeta \text{cm}^{-3}\text{seg}^{-1}$, el número de electrones producidos en el volúmen crítico entre el instante t_0 en el cual se alcanza el mínimo de voltaje de inicio de corona y t , estará dado por:

$$N = \int_{t_0}^t \int_V \zeta \, dV \, dt \quad \text{ec.2.5}$$

La probabilidad $P_t \, dt$ de que la primera corona ocurra en el intervalo de tiempo $[t, t+d]$, será:

$$P_t \, dt = \left| \int_V \zeta \, dV \right| \left| 1 - \int_{t_0}^t P_t \, dt \right| \, dt \quad \text{ec.2.6}$$



$E_i = 49.5 \text{ Kv/cm}, 53\text{Kv/cm}, 60 \text{ Kv/cm}, 80 \text{ Kv/cm}.$

$U_i = 70 \text{ Kv} \quad 75 \text{ Kv} \quad 85 \text{ Kv} \quad 110 \text{ Kv}$

fig.2.7.-Variación del volúmen donde puede iniciarse una avalancha crítica como una función del voltaje; punta de 2cm. de diámetro.

El problema que se presenta es encontrar el mecanismo de producción de electrones libres y calcular su razón de producción ζ . Usualmente la producción de electrones libres es atribuida principalmente al descenlace de iones negativos de oxígeno, pero los

valores de ζ comparados con el más adecuado de los resultados experimentales, son muy diferentes de los que generalmente se dan en la literatura. Si el efecto de la humedad se toma en consideración, es posible obtener resultados más consistentes, como se muestra en las curvas de la figura 2.5 junto con los histogramas.

Este tipo de aproximación parece ser satisfactorio, aunque es necesario insistir más sobre este campo para mejorar los conocimientos sobre la naturaleza del mecanismo de producción de los electrones. (5)

Durante la formación de la corona se crean cargas de ambas polaridades, una cierta cantidad de cargas negativas fluye hacia el electrodo, de modo que una carga espacial positiva neta queda en la región donde los streamer se propagan. El valor de esta carga depende en gran parte de la divergencia de la distribución del campo por efecto del electrodo y del valor del voltaje de inicio de corona; la fig.2.8 da una serie de resultados obtenidos con varios electrodos, y diferentes intervalos.

La carga de la corona modifica la distribución del campo eléctrico, la fuerza del campo se reduce cerca del electrodo y aumenta fuera de la región de corona. Por lo que no se detectan más fenómenos de ionización cerca del electrodo durante un cierto período (período obscuro) después de que ocurre la corona. Como se ha visto en algunos casos, la duración del período obscuro puede ser reducido a cero.

Con el fin de entender como se desarrolla el fenómeno de la descarga durante el período obscuro, sería necesario conocer la distribución de carga producida por la corona y así poder calcular la

distribución del campo total. La dificultad de hacer esto por simulación de una distribución de streamers, radica en la falta de información, como se mencionó antes del desarrollo simultaneo de dos streamers cercanos entre si.

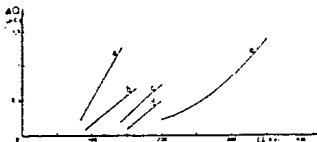


fig.2.8.-Carga de la corona en función del voltaje de inicio. a) 150 cm, diámetro de la punta 2cm. ; b) 30 cm., diámetro 2cm.;c) 150cm.; longitud de la punta 70cm; d) 150cm. diámetro 2cm.,longitud 50cm. e) 10m. extremo cónico con 1cm. de radio de curvatura.

Una aproximación más simplificada conciste en omitir un número igual de cargas positivas y negativas y suponer únicamente la presencia de la carga positiva neta. Esta carga puede medirse y su distribución puede establecerse en base a los efectos causados por su presencia. Como las variaciones del campo eléctrico durante el efecto de corona dependen del valor y posición de la carga de corona, pueden utilizarse para este propósito, las mediciones del campo eléctrico en la superficie del electrodo.

En una configuración esfera-plano se encontró que la carga podría ser analizada como si estuviera distribuida en un disco en la frontera de la región de corona

Más recientemente se ha mostrado que una distribución de carga en un volúmen cónico con su vértice en el electrodo, se ajusta satisfactoriamente a los resultados experimentales.

Esta aproximación puede improvisarse para obtener un mejor conocimiento de las variaciones del campo a lo largo de toda la superficie del electrodo.(5)

2.2.-Período obscuro.

En párrafos anteriores se mencionó que durante el período obscuro no ocurren fenómenos de ionización, si el fenómeno vuelve a ocurrir origina que la distribución del campo que fué modificada por la carga espacial, cambie con el tiempo y la fuerza del campo en algunos puntos alcance valores bastante altos para causar ionización. La distribución del campo puede ser modificada principalmente por tres factores:

- a)- El incremento del voltaje aplicado
- b)- El movimiento de la carga espacial
- c)- El cambio de las características de un streamer.

a)-Generalmente la primer corona ocurre durante el frente del impulso aplicado, así pues durante el período obscuro el voltaje aplicado aumenta, causando que el campo actual se incremente en todo el intervalo. La razón de este incremento depende de la forma del impulso y del tiempo de inicio de corona para cada forma de electrodo.

Ahora si el electrodo tiene un radio de curvatura más pequeño, la corona ocurre en voltajes más bajos cuando la razón de rizo es más grande; por aumento del radio de curvatura el voltaje de inicio aumenta y la razón de rizo del voltaje durante el período oscuro disminuirá.

b).-Después de que ocurre la corona, la carga espacial positiva que causa la disminución del campo se moverá lejos del extremo del electrodo, su efecto se reduce con el tiempo y la distribución del campo tiende a la geometría. Este hecho se muestra claramente cuando se aplica un voltaje directo, en este caso una corona es seguida por otra cuando la distribución del campo tiende a tomar la geometría después de que la carga espacial se ha movido. El efecto del movimiento de la carga depende en gran parte de la duración del período oscuro; para períodos de algunas decenas de microsegundos y un campo eléctrico no mayor de 20 a 25 KV/cm en la región de corona, el movimiento de la carga puede ser del orden de algunos centímetros, este desplazamiento es suficiente para causar variaciones notables en el campo local.

c).-Cuando la corona ocurre, fluye una corriente a través de los streamers. La energía adquirida del campo por las cargas no es suficiente para causar ionización y es perdida en calentamiento del aire por colisiones de las cargas con las moléculas del aire.

Este efecto es mayor en la parte cercana del electrodo porque el flujo de cargas llega de todas las ramificaciones del streamer. Esto es posible debido a que el efecto de termoionización hace que aumente la conductividad de la parte inicial del streamer causando que el

campo en su extremo aumente. La parte inicial, la cual aparece en ocasiones más brillante se le llama stem (tallo). Cuando la corriente deja de fluir el grado de ionización empieza a decaer y la conductividad del stem crece con el tiempo.

Estas tres causas generalmente actúan simultáneamente pero su influencia es diferente de acuerdo a las condiciones experimentales, como por ejemplo, en el caso de un impulso de voltaje con tiempo de frente corto, la duración del período obscuro se reduce a cero como se puede ver en el oscilograma de corriente, fig. 2.9, en el cual un segundo pulso ocurre antes de finalizar el primero. Debido al corto tiempo del intervalo entre los dos pulsos, la influencia no puede ser atribuida al movimiento de la carga espacial; por otra parte, el comportamiento es independiente de la forma del electrodo, el segundo pulso tiene que ser atribuido principalmente al efecto de la geometría del campo que aumenta por la alta razón de rizo del voltaje.

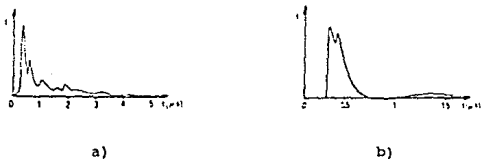


fig.2.9.- Corriente del efecto de corona. a).- Impulso de voltaje con frente corto. b).- Electrodo con radio de curvatura grande.

Así pues, el período obscuro no ocurre en el caso de electrodos con radio de curvatura grande cuando la distribución del campo es más

uniforme, fig. 2.9b e independientemente de la razón de ríso. En este caso los streamers se desarrollan a lo largo de una gran distancia causando un flujo mayor de carga, de modo que el aumento del campo es principalmente debido a la termoionización de los stems.

En el caso de un impulso de voltaje con frente largo, aplicado a electrodos que no tienen el radio de curvatura demasiado grande, el período obscuro sí ocurre. La fig. 2.10 muestra que su duración depende de la carga de corona y del valor pico del voltaje aplicado, con forma del impulso constante. Su duración se incrementa con el aumento de la carga, porque su efecto de amortiguamiento es mayor, y disminuye con el aumento del valor pico del voltaje porque es más grande la razón de ríso del campo eléctrico de tal forma que hasta ahora se tienen ecuaciones no cuantitativas de la duración del período obscuro y de los parámetros que lo hacen variar.

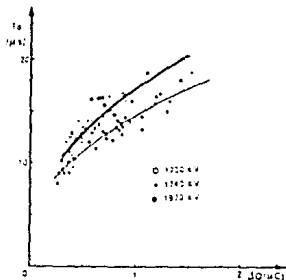


fig.2.10.- Duración del período obscuro en función de la carga de corona.

Se ha hecho un intento de evaluar cuantitativamente la variación del campo cerca del electrodo después de ocurrir la corona, con el fin de explicar dos distribuciones diferentes del tiempo de ruptura observados en un intervalo de 30 cm. sometido a impulsos de voltaje con tiempo de frente corto y tiempo de cola grande. Y mostró que el campo total puede presentar dos máximos; uno inmediatamente después de la primera corona por los efectos de la termoionización y del campo aplicado, y otro después de algunos cientos de microsegundos por el movimiento de la carga espacial de corona. (5)

Una ampliación de los estudios en este sentido podrían dar mayores detalles de los fenómenos que ocurren durante el período obscuro.

2.3.- Teoría de crecimiento del líder.

Cualquiera que sea la causa que produce una nueva ionización, después de la primera corona se forma un canal más ionizado el cual se alarga hacia el electrodo opuesto. Este canal generalmente es referido como el canal de predescarga y se le conoce como "líder".

La formación del líder puede detectarse por medio de fotografías del efecto producido por la aplicación de un voltaje menor que U_{50} . De acuerdo con el valor del voltaje aplicado, el líder puede parar después de haber cruzado una parte del espacio entre los electrodos ó alcanzar el electrodo opuesto, causando la ruptura.

La propagación del líder se caracteriza por dos etapas. Una etapa en la que el líder se propaga con una velocidad casi constante del orden de 1.5 a 2cm./ μ s, esta velocidad permanece invariable hasta el instante de inicio del salto final tr. Durante esta etapa puede ocurrir que el líder pare, ya sea por que el voltaje aplicado no es suficiente o por cualquier otra razón. A esta etapa se le conoce como etapa de crecimiento continuo del líder.

La otra etapa se caracteriza por un incremento exponencial de la velocidad del líder, cruzando de esta forma el último tramo para alcanzar el electrodo opuesto. Durante esta etapa el líder ya no puede parar y se le conoce como etapa del salto final.

En la primera etapa el canal del líder es casi obscuro y esta precedido por una corona brillante que emana de su extremo inferior, esta corona se va extendiendo conforme avanza el líder. La presencia del canal solamente se detecta por las reiluminaciones de su trayectoria, cuando estas ocurren.(5)

De acuerdo a los estudios realizados por el grupo Les Renardieres, las características eléctricas de la propagación del líder, además de estar influenciadas por las condiciones atmosféricas, como son la densidad, humedad y temperatura, también dependen del tiempo de cresta y de la forma de onda del voltaje aplicado.

La figura 2.11 muestra dos oscilogramas típicos de medición de carga eléctrica, los cuales están asociados con la fotografía de la descarga tomada por un convertidor de imágenes.

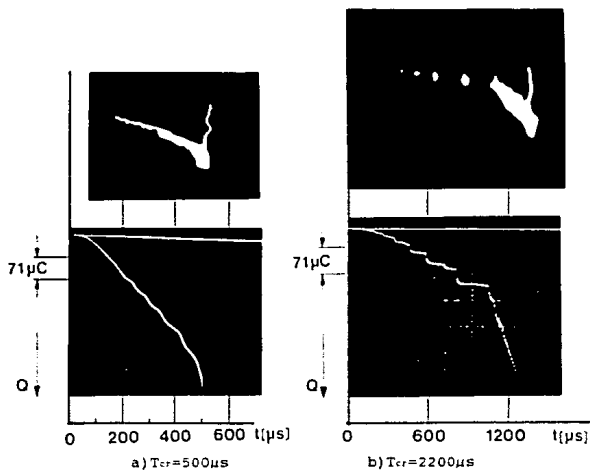


fig.2.11.-Características del desarrollo del líder, mostrando la carga inyectada junto con el rayo tomado con un convertidor de imágenes.

En la fotografía 2.11a) se trata de un impulso con tiempo de cresta de $500 \mu s$ y muestra una inyección de carga eléctrica en forma continua y un crecimiento del líder prácticamente continuo.

En la fotografía 2.11b) se presenta un impulso con mayor tiempo de cresta, $2200 \mu s$, en este caso el avance del líder es precedido por varios saltos, tanto de carga eléctrica como de emisión de luz. Después de estos saltos, los cuales pueden variar tanto en número como en amplitud, la carga eléctrica y la longitud del líder aumentan en forma continua.

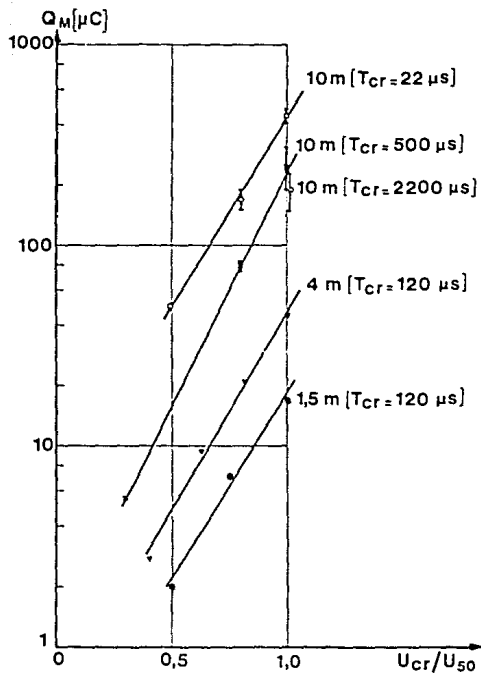


fig.2.12.-Gráfica de la carga total inyectada con varias formas de onda en función de U_{cr}/U_{50} , considerando diferentes distancias.

En la figura 2.12 se ha graficado la carga total Q_m en escala logarítmica contra la relación U_{cr}/U_{50} ; donde U_{cr} es el voltaje de cresta del impulso aplicado y U_{50} es el voltaje con 50% de probabilidad de descarga. Se consideran distancias de separación entre los electrodos punta-plano desde 1.5m hasta 10.0m.

De esta gráfica se ve que hay una relación exponencial entre la carga inyectada y U_{cr}/U_{50} aunque a su vez esta relación depende de la distancia entre los electrodos y del tiempo de cresta.(1)

CAPITULO 3

3.1.- Instalaciones y equipo utilizado en las pruebas experimentales de medición de carga.

En los estudios del fenómeno de la descarga en grandes intervalos de aire se presentan varias dificultades, algunas son producto de la complejidad del fenómeno como son el carácter aleatorio de los eventos luminosos y la interferencia electromagnética, otras dificultades se deben a las condiciones en que la descarga se produce, como son: la distancia de separación de los electrodos, los altos voltajes y el hecho de que los primeros eventos ocurren en la superficie del electrodo energizado, es decir, el electrodo punta.

Para resolver en parte estas dificultades, los aparatos de medición se colocaron lejos de la configuración donde se produce la descarga, sin embargo, esto ocasiona que se reduzca la sensibilidad de los aparatos de medición y en consecuencia disminuye la precisión en las mediciones.

Como ya se mencionó, las pruebas preliminares de la medición de la carga eléctrica se realizaron en las instalaciones exteriores de pruebas del Laboratorio de Extra Alta Tensión del LAPEM.

Para la descripción de los aparatos y equipos utilizados en las pruebas experimentales, se pueden clasificar en tres grupos:

- a) Instalaciones que conforman el circuito de prueba.
- b) Equipo para producir la descarga, incluyendo la configuración punta-plano.
- c) Equipo de medición.

Dentro del grupo a) se consideran dos instalaciones diferentes. La primera consta de una caseta de control, una tienda inflable y tres estructuras metálicas para la soportación del electrodo punta. La configuración punta-plano se colocó separada de las estructuras metálicas una distancia suficientemente grande para evitar que la presencia de las estructuras alterara el campo eléctrico y en consecuencia el comportamiento de la descarga.

La caseta de control y la tienda inflable se encuentran unidas por una lona y solamente las separa la puerta de acceso a la tienda inflable.

En la caseta de control se encuentran instalados la consola de operación del generador de impulsos y todos los aparatos de medición, y en la parte central de la tienda se encuentra el generador de impulsos, como se muestra en la figura 3.1.

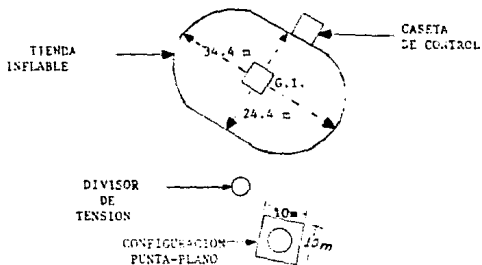


Fig.3.1.- Primer arreglo para la medición de carga.

El segundo arreglo se debió a que se utilizó un generador de impulsos de dimensiones mayores y de mayor capacidad que el del primer arreglo, por lo que se cambió la distribución de los aparatos como se indica en la figura 3.2. Otra diferencia del primer arreglo es la utilización de una caseta de control de paredes metálicas, la cual reduce la interferencia sobre los aparatos de medición.

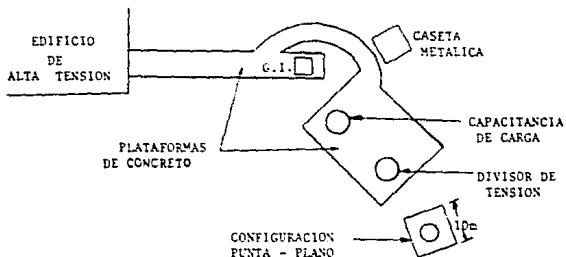


Fig.3.2.- Segundo arreglo utilizado para la medición de carga.

En el grupo b), el principal aparato para la producción de la descarga es el generador de impulsos. En el primer arreglo, fig.3.1, se utilizó un generador de impulsos de tipo interior, por lo cual se instaló en la tienda inflable, sus características principales son las siguientes:

Voltaje nominal: 2.8 MV
 No. de etapas: 14
 Energía: 163 KJ

En el caso del segundo arreglo, fig.3.2, se utilizó un generador de impulsos de tipo exterior con capacitancia de carga y divisor de voltaje independientes, sus características principales son:

Voltaje nominal: 4.8 MV

No. de etapas: 24

Energía: 280 KJ

Ambos generadores son marca Haefely y se basan en el principio de E. Marx que consiste en cargar varios condensadores idénticos conectados en paralelo para después descargarlos en serie, obteniendo de esta forma impulsos de voltaje con valor pico tan alto como sea posible, dependiendo del número de etapas del generador, y con posibilidad de variar el tiempo de duración del impulso.

La configuración punta-plano utilizada en el estudio de la carga eléctrica, se construyó de la siguiente manera.

El electrodo punta consta de un tubo de cobre de 6 m. de largo y 4 pulgadas de diámetro, unido en su extremo superior a un electrodo de forma esférica el cual está suspendido por tres cuerdas de material aislante, de modo que el tubo y la esfera quedan eléctricamente aislados, es decir, suspendidos en el aire, en la figura 3.3 se muestra la configuración completa y sus dimensiones.

El principal motivo de la esfera es el de proteger de la interferencia o de una posible descarga, sobre el transmisor del sistema de fibra óptica que se coloca dentro de ésta esfera durante la medición de la carga.

El electrodo plano es un cuadrado de 10 m. de lado que se formó con varias láminas de aluminio traslapadas entre sí.

En el extremo inferior del electrodo punta se añadió una sección de tubo del mismo diámetro para la colocación de una superficie semiesférica, esta sección del tubo se aísla eléctricamente del resto del electrodo con una placa de material aislante que forma parte del transductor para la medición de la carga, que se coloca en ese lugar.

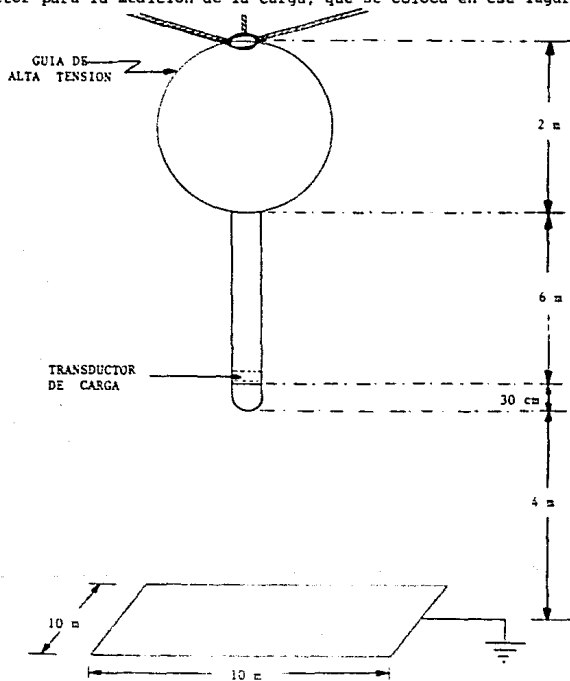


Fig.3...-3 Configuración experimental punta-plano. (Sin escala)

En la figura 3.4 se dan más detalles de esta sección del electrodo punta.

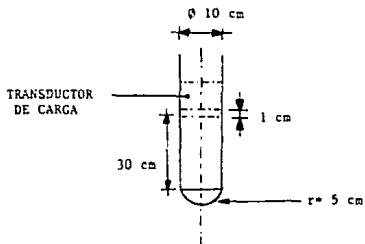


Fig.3.4.- Detalle del extremo inferior del electrodo punta.

Respecto a los aparatos de medición, grupo c), se utilizaron dos sistemas de medición simultáneamente, uno que registra las características del impulso de voltaje aplicado y consiste en, un divisor de voltaje, un volmetro de pico, un medidor del tiempo al corte y un osciloscopio de impulso, todos estos aparatos se encuentran dentro de la caseta de control con excepción del divisor de voltaje.

El otro sistema de medición es exclusivamente para la medición de la carga eléctrica y está constituido por, el transductor de carga, un sistema de transmisión de fibra óptica que está formado por un transmisor, un cable de fibra óptica y un receptor cuya salida se conecta finalmente a un osciloscopio. El transductor de carga y el transmisor se colocan en la configuración punta-plano, y en la caseta el receptor y el osciloscopio.

El transmisor está constituido por un amplificador con un amplio ancho de banda a la entrada previamente protegido con un generador modulador de corriente y con un oscilador que controla la corriente, la acción del oscilador es la de modular la señal de entrada en una frecuencia de salida proporcional a la señal de modulación, esta nueva señal va a un circuito de transistores que modulan la frecuencia de un diodo emisor de luz infrarroja (LED).

Posteriormente la señal de salida del transmisor es llevada hasta el receptor mediante un cable de fibra óptica.

En el receptor la señal de luz es captada por un fotodiodo el cual convierte la luz modulada en frecuencia en una corriente de la misma conformación, un circuito demodulador reconvierte la señal modulada a la señal original, y finalmente un amplificador de tensión junto con un sistema de filtros liberan la señal del ruido que pudiese haber adquirido. (6)

Características del transmisor:

- Impedancia de entrada: $1\text{ M}\Omega$ en paralelo con 50 pF .
- Voltaje de entrada nominal: $\pm 1\text{V}$.
- Máxima sobretensión de entrada permanente: 100 Vef .
- Máxima sobretensión impulsiva: 1000 Vp .
- Voltaje de alimentación: 12 V c.c. (batería).
- Blindaje: doble caja de cobre estañada.
- Tipo de servicio: exterior.

Características de la fibra óptica:

- Tipo: QSF-400.
- Material: Cuarzo y silicio.
- Transmisión: monomodo
- Atenuación: 10 dB/km.
- Diámetro: 400 micras.
- Longitud: 100 m.

Características del receptor:

- Impedancia de salida: 50 Ω .
- Voltaje de salida: \pm 10 V.
- Corriente de salida: 100 mA.
- Alimentación: 220 V, 60 Hz.
- Tipo de servicio: interior.

Características como sistema:

- Ganancia: $10 \pm 0.5 \%$.
- Ancho de banda (- 3 dB) : dc - 100 KHz.
- Tiempo de subida: 3.5 μ s.
- Tiempo de respuesta: 1.8 μ s.
- Relación señal-ruido: 50 dB.
- Error de linealidad: 1 %.
- Defasamiento: 180 grados.
- Constructor: CESI (6).

La señal de salida del receptor se registró en un osciloscopio de memoria con un ancho de banda de 100 MHz. Finalmente todos los

aparatos utilizados en la medición de la carga, quedan distribuidos de la siguiente forma; en la caseta de control estan: la consola de control del generador, el volmetro de pico, el medidor del tiempo al corte, el osciloscopio de impulso, el osciloscopio de memoria y el receptor del sistema de fibra óptica. En el caso del primer arreglo, el generador de impulsos se encuentra en la tienda inflable y en el caso del 2o. arreglo, el generador de impulsos se encuentra a la interperle al igual que el divisor de voltaje, el transductor de carga y el transmisor de fibra óptica se encuentran en el electrodo punta. En la figura siguiente se muestra el diagrama del circuito utilizado para la medición de la carga eléctrica con el sistema de fibra óptica, simultáneamente con el sistema de medición de las características del impulso de voltaje aplicado.

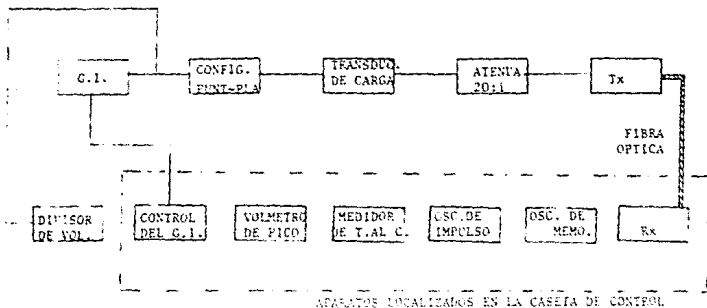


Fig. 5. Diagrama del circuito utilizado para la medición de la carga eléctrica.

El montaje de los circuitos de prueba se facilitó bastante con la utilización de algunas máquinas de motor como: grúas de varios tipos y montacargas.



CAPITULO 4

4.1. Principio de funcionamiento del transductor de carga.

El transductor para la medición de la carga eléctrica consiste en un condensador de capacitancia fija C_m , y su principio de funcionamiento se basa en los siguientes conceptos.

Durante la aplicación del impulso de voltaje al electrodo punta, la configuración punta-plano se comporta como un condensador en el cual se crea un campo eléctrico no-uniforme por la geometría de los electrodos y por el voltaje impulsivo que lo produce. Debido a la intensidad del campo eléctrico se forman cargas de ambas polaridades en la región cercana al extremo inferior del electrodo punta, estas cargas son producidas por diferentes procesos, como la ionización por choque. Los efectos de corona y de propagación del líder son manifestaciones luminosas de los procesos de ionización en los cuales se generan las cargas.

La carga eléctrica correspondiente a los efectos luminosos fluye hacia el electrodo punta, el valor de esta carga depende de la distribución geométrica del campo eléctrico, del valor del voltaje aplicado y de la forma de onda del impulso de voltaje.

Para registrar esta carga se aisló una superficie hemisférica en el extremo inferior del electrodo energizado y se conectó en serie con el condensador de medición C_m , como se indica en la figura 4.1, de tal manera que la carga eléctrica que se registra en el condensador de medición es igual a la carga distribuida en la superficie hemisférica.

Con el fin de lograr mediciones de carga generada por impulsos del orden de 1000 KV se construyó un arreglo de condensadores de medición con un valor promedio de capacitancia de 5.3 μF con la posibilidad de variar su capacidad de medición de carga con la incorporación en el sistema de medición, de atenuadores mixtos, es decir, del tipo resistivo-capacitivos.

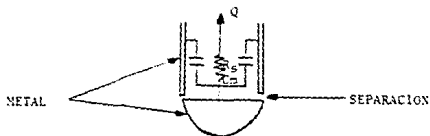


Fig. 4.1. Transductor para la medición de carga en el electrodo punta C_m : Condensador de medición, R_s : Resistencia de pseudoacoplamiento.

4.2. Diseño y construcción.

El condensador de medición C_m del transductor para medir la carga, consiste en un arreglo coaxial de 12 condensadores iguales de 0.47 μF a 600 V cada uno, conectados en paralelo, de modo que el valor real del condensador de medición fué $C_m = 5.3 \mu\text{F}$. El arreglo coaxial tiene la ventaja de que reduce la inductancia total del condensador C_m , permitiendo un mejoramiento en su tiempo de respuesta y desde el punto de vista práctico facilita el cambio o reparación de sus componentes.

La diferencia de potencial en los extremos del condensador C_m se midió vía una resistencia de pseudoacoplamiento R_s junto con un conector coaxial, la resistencia R_s se formó con tres resistencias de 270Ω conectadas en paralelo para aumentar la potencia de disipación, su valor fué $R_s = 90 \Omega$.

Para protección del transductor contra un posible sobrevoltaje sobre sus componentes se conectó un sparkgap en paralelo con los condensadores.

La señal de salida del transductor es transportada por un cable coaxial a través del interior del tubo que forma el electrodo punta, hasta su extremo superior donde se conecta al transmisor Tx del sistema de transmisión de fibra óptica, el cual está dentro de la esfera equipotencial.

Antes de la conexión del cable coaxial al transmisor se interconectó un atenuador de voltaje para protección del transmisor y para adaptar el nivel de voltaje de la señal, al nivel de entrada del transmisor que es de ± 1 V.

La forma, dimensiones y materiales que conforman el transductor se eligieron en base a los requerimientos siguientes:

- 1) Los puntos en que ha de existir o no contacto eléctrico para formar el circuito de la figura 4.1.
- 2) El tamaño y número de los componentes (condensadores y resistencias)
- 3) El diámetro interior del electrodo punta.

En la fotografía siguiente se puede apreciar el aspecto físico del transductor de carga y dar una idea de su tamaño real.



Las principales características eléctricas del transductor de carga son las siguientes:

Tensión máxima de entrada: variable (depende del atenuador) (172 Kv)
Capacitancia total: 5.3 μ F
Factor de disipación: 0.008
Conector de salida: conector coaxial
Blindaje: tubo de cobre

En la figura 4.2, se muestra el transductor de carga incorporado al sistema de medición completo, indicando los tipos de alimentación.

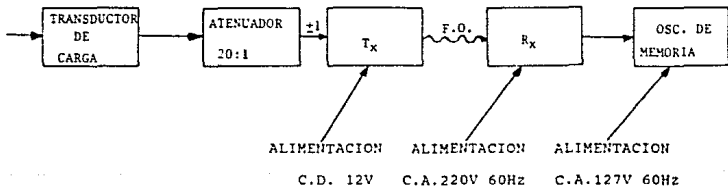


Fig. 4.2. Sistema de medición de carga.

La ganancia del sistema de medición de carga depende del atenuador que se esté utilizando, en caso de no utilizar atenuador, la ganancia es 10. Por otra parte la capacidad de medición del sistema también se modifica con los atenuadores.

Los atenuadores con mayor relación de atenuación permiten una mayor capacidad de medición, mientras que la medición mínima se registra sin atenuador.

El límite superior de medición de carga se alcanza con el atenuador 100:1 y la carga máxima posible de medir es $C_m V_s = 530 \mu C$ y la mínima es $0.1 \mu C$ sin atenuador, como se puede ver en la tabla 4.1, ésta carga mínima no es muy confiable ya que corresponde a un voltaje comparable a la señal de ruido. Para lograr una mejor precisión en mediciones de carga pequeñas con este mismo sistema, sería necesario disminuir el valor de capacitancia del condensador de medición C_m , es claro que los valores de carga pequeños corresponderían a un voltaje bajo del impulso aplicado o bien, a intervalos entre electrodos del orden de centímetros, ver figura 4.3.

Igualmente, si se requiere medir valores de carga mayores que $530 \mu C$, se tendría que aumentar la capacitancia C_m , otra opción, sería la utilización de atenuadores con mayor relación de atenuación. Los atenuadores utilizados en las pruebas tienen una precisión de $\pm 0.5 \%$ en su relación de atenuación, en el apéndice 1 se da mayor información sobre las características de los atenuadores.

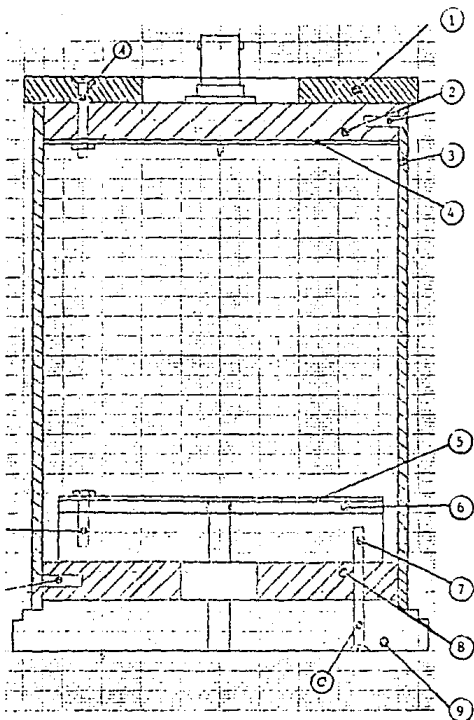
V máx. en T _r	ATENUADOR	Q mín. (mc)	Q máx (mc)	F
± 1V	SIN ATENUADOR	0.1	5.3	0.1
± 1V	5:1	0.3	26.5	0.5
± 1V	10:1	0.53	53.0	1
± 1V	20:1	1.06	106.0	2
± 1V	50:1	2.7	265.0	5
± 1V	100:1	5.3	530.0	10

F = V_{em}/V_{osc} : factor de escala.

Tabla 4.1.- Valores máximos y mínimos posibles de registrarse con $C_m = 5.3 \mu F$ incorporado a la cadena de medición.

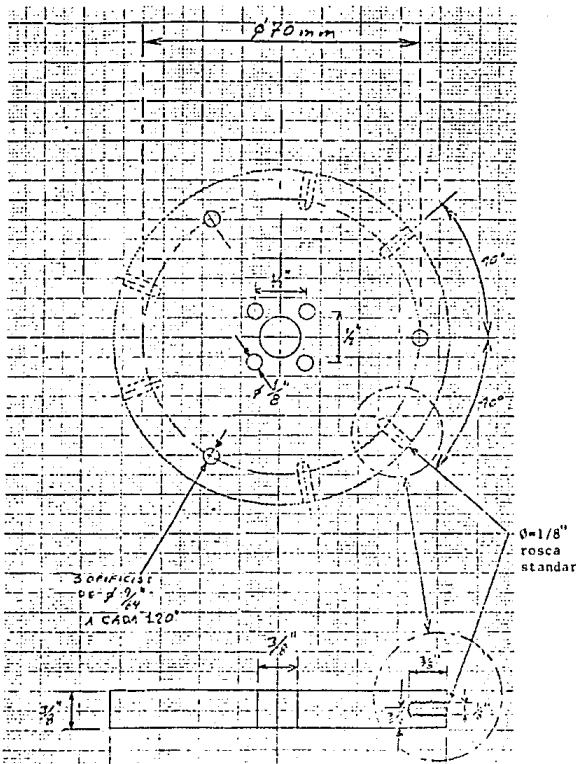
La construcción del transductor de carga además de cumplir con el arreglo coaxial de los condensadores, posee una estructura compacta y rígida formando una sola unidad, que son las características requeridas para instalarse en el electrodo energizado, ya que del transductor queda sujeta la sección con la superficie hemisférica, la cual tiene un peso considerable.

En los dibujos siguientes se muestra una descripción de cada una de las piezas que componen el transductor de carga incluyendo dimensiones y materiales utilizados.



1.-Disco de celoron. 2.-Disco de aluminio. 3.-Tubo de laton
 4 y 5.-Discos de cobre. 6.-Disco de aluminio. 7.-Disco de celoron
 8.-Disco de aluminio. 9.-Disco de celoron.

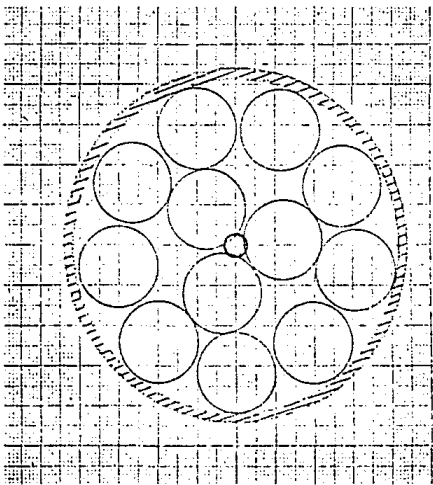
s/escala



$\phi = 84.65 \text{ mm}$

esc. 1:1

Dibujo del disco superior de la sonda en la cual va conectado el conector coaxial; hecho de una placa de aluminio de $1/4''$



Los círculos representan los espacios disponibles en los cuales se pueden colocar los capacitores.

CAPITULO 5

5.1.- Evaluación de la carga eléctrica.

Cuando ya se ha logrado obtener el tipo de oscilograma esperado para la medición de la carga eléctrica, el siguiente paso consiste en distinguir la cantidad que se quiere medir, ya que en el oscilograma de carga se superponen dos tipos de carga eléctrica, a saber: la carga de desplazamiento o carga parásita Q_p y la carga de conducción o también conocida como carga de propagación del líder Q_l , que es nuestra variable de interés.

De modo que $Q_t = Q_p + Q_l$ o sea que $Q_l = Q_t - Q_p$ donde Q_t es la carga total registrada en el oscilograma. A continuación se describe un procedimiento para evaluar y diferenciar ambas cargas.

El procedimiento consiste en aplicar un impulso de voltaje U_a de polaridad positiva que sea ligeramente menor que V_1 , donde V_1 es el voltaje de inicio del efecto corona, de esta manera se asegura que solamente existe corriente de desplazamiento en la configuración y por tanto la carga que se registre en la sonda será únicamente Q_p . Una vez obtenido el valor de Q_p se puede calcular la capacitancia parásita, la cual es una cantidad constante para cada tipo de configuración con una distancia fija de separación entre los electrodos. Posteriormente, ya determinada la capacitancia parásita es posible obtener la carga parásita producida por cualquier impulso de voltaje mayor que V_1 , de tal manera que la precisión en la medición de la carga Q_l depende en gran parte de la precisión y del método que se utilice para evaluar la capacitancia parásita.

5.2.- Análisis del proceso de evaluación de la carga de conducción.

Para aplicar el procedimiento mencionado en el punto anterior, vamos a analizar lo que sucede en el circuito de prueba en diferentes circunstancias. En la siguiente figura 5.1 se muestra el circuito eléctrico, el cual representa la forma esquemática del generador de impulsos, el divisor de voltaje y la configuración punta-plano. En el recuadro de líneas punteadas, C_p es la capacitancia total del generador, R_f y R_c son las resistencias que dan la forma de onda del impulso de voltaje en las partes de frente y de caída respectivamente. Las resistencias R_1 , R_2 y los capacitores C_1 y C_2 corresponden al divisor de voltaje, cuyas características y valores ya se mencionaron anteriormente.

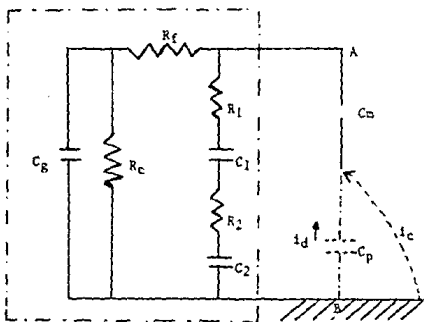


fig.5.1.-Circuito de prueba.

Para cualquier diferencia de voltaje aplicado entre los puntos A y B, la carga registrada en la sonda estará dada por:

$$Q = C_p V_a \quad \text{ec.5.1}$$

Para determinar la capacitancia parásita se sigue el procedimiento mencionado en el inciso anterior. Cuando $U_s < U_1$, se registra únicamente la corriente de desplazamiento i_d , la cual corresponde a la carga parásita Q_p , y como $C_p \ll C_s$ la caída de voltaje en C_s es despreciable comparada con U_s , por lo tanto:

$$C_p = \frac{Q_p}{U_s} \quad \text{ec.5.2}$$

Con esta expresión (5.2) es posible calcular C_p ya que U_s se conoce y $Q_p = C_s V_{sp}$, donde V_{sp} es el voltaje parásito registrado en la sonda. De modo que:

$$C_p = \frac{C_s V_{sp}}{U_s} \quad \text{ec.5.3}$$

Ahora vamos a analizar el caso cuando el voltaje aplicado es mayor que el voltaje de inicio de corona, o sea, $U_s > U_1$. Para este caso se presentan ambas corrientes; la de desplazamiento (i_d) y la de conducción (i_c), de modo que la corriente total que pasa por la sonda es:

$$i_t = i_d + i_c$$

entonces: $Q_p + Q_1 = C_s V_s$

de donde: $Q_1 = C_s V_s - Q_p$.

Despejando Q_p de la ecuación 5.2 y sustituyendo se tiene finalmente:

$$Q_1 = C_s V_s - C_p U_s \quad \text{ec.5.4}$$

En función de los voltaje registrados en la sonda, la ecuación 5.4 cambia a:

$$Q_1 = C_s V_s - C_p \frac{C_s V_{sp}}{C_p}$$

$$Q_1 = C_s (V_s - V_{sp}) \quad \text{ec.5.5}$$

En la ecuación 5.5 se puede apreciar que la carga de conducción Q_i es directamente proporcional a la diferencia de los voltajes V_s y V_{cr} , en la cual la capacitancia de la sonda C_s es la constante de proporcionalidad. De tal manera que es posible hacer un análisis del comportamiento de la carga inyectada en impulsos tanto de aguante como en los que existe descarga, tomando en consideración las formas de onda del voltaje de los oscilogramas obtenidos. Las figuras 5.2 y 5.3 muestran una secuencia de las gráficas del voltaje aplicado U_s , el voltaje de la sonda V_s y de las cargas Q_c , Q_d y Q_i , tanto en aguante como en descarga.

De lo anterior se tiene que en caso de lograr determinar el comportamiento de la carga total entonces la carga Q_i puede también calcularse en cualquier instante de tiempo del impulso aplicado.

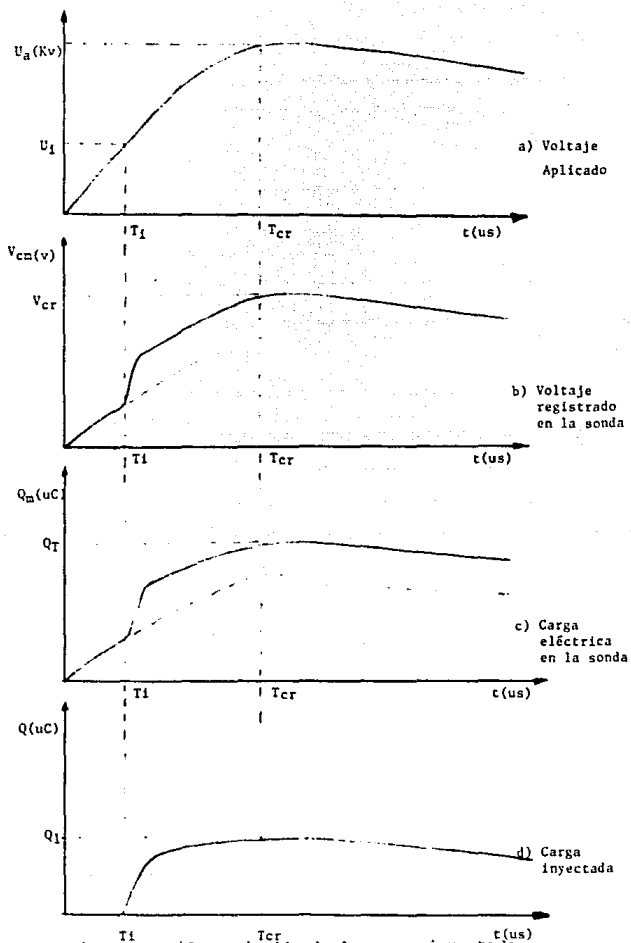


Fig.5.2.- Diferenciación de la carga inyectada.

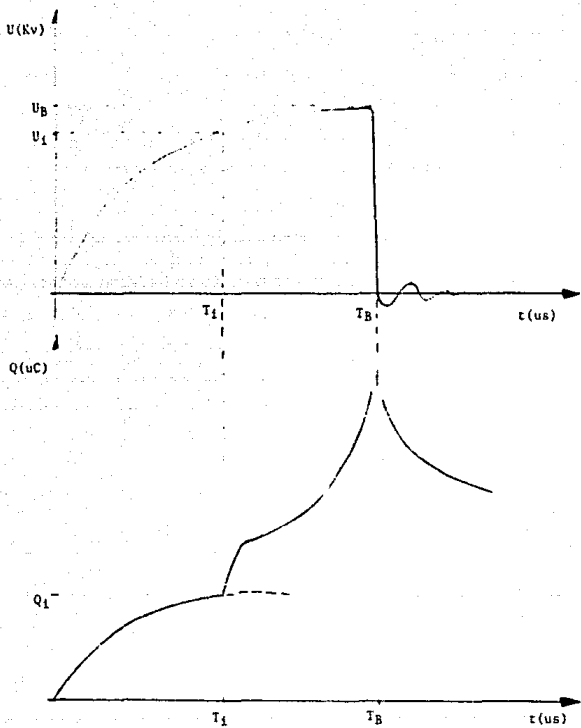


Fig.5.3.- Formas de onda típicas del voltaje aplicado U_0 y de la carga eléctrica cuando hay descarga.

5.3.- Pruebas y ensayos de la sonda.

Para verificar el funcionamiento de la sonda de carga se realizaron varias pruebas, utilizando siempre la configuración punta-plano. Al término de cada prueba se fueron analizando y corrigiendo las fallas que se iban presentando.

Algunas formas de como se resolvieron los diferentes tipos de problemas fueron: cambiar el valor de la capacitancia de medición C_m , utilizar capacitores de mejor calidad y de mayor voltaje, aumentar la potencia de disipación de la resistencia de pseudo acoplamiento R_s , la inclusión de un protector de voltaje (spark-gap), la incorporación de un blindaje electromagnético, etc. Para elegir la mejor solución, se estudiaron y analizaron los efectos mecánicos y eléctricos sobre la sonda durante la aplicación de los impulsos de voltaje. El resultado fue la optimización del funcionamiento de la sonda, así como de duración de su batería, igual al tiempo de duración de la prueba. (1 hr. aprox.)

La siguiente tabla muestra algunos cambios en las características de construcción y de las fallas que se presentaron durante las tres primeras pruebas preliminares de la medición de la carga eléctrica.

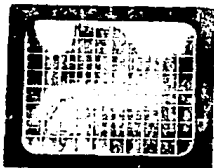
No. Prueba.	No. capaci- tores.	C_m (μ)	R_s (Ω)	d(m)	U_a .max. (kv)	No.de tiros.
1a.	20	3.01	68	4	1010	6
2a.	12	5.47	82	2	650	11
3a.	12	5.3	90	3.6	520	20

A continuación se presentan algunos oscilogramas y observaciones de cada prueba.

Primera prueba.- Durante los primeros 6 impulsos se obtuvo el tipo de señal que es característica de la carga eléctrica, según la bibliografía. Al siguiente disparo se suspendió la prueba, la resistencia R_s y tres capacitores se habían dañado y la capacitancia de medición se redujo a $2.75 \mu\text{F}$.



898 KV



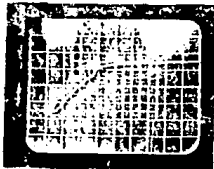
911 KV



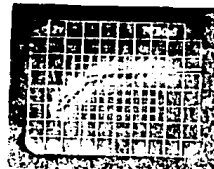
964 KV



996 KV



1026 KV



1058 KV

Se utilizó un atenuador de 50 : 1.

Segunda prueba.- Se interrumpió la prueba porque se estaban registrando anomalías en la señal del osciloscopio. El valor de C_m se mantuvo en 5.47 μF y la resistencia R_s se quemó. En ninguno de los 11 impulsos aplicados apareció la forma de la señal de carga eléctrica esperada.

Tercera prueba.- Se aplicaron 20 impulsos y después se suspendió la prueba porque se estaban registrando fallas en el sistema de medición (fibra óptica). Se desmontó la sonda y no presentó ningún daño físico y conservó su valor de capacitancia C_m y de resistencia R_s . La señal de carga se registró con bastante interferencia lo cual causa error en la medición.

Posteriormente se hicieron otras pruebas y aunque no se lograba medir la carga, si contribuyo al mejoramiento de la sonda. Una vez lograda la optimización se procedió a la realización de una prueba sistemática de la medición de carga eléctrica, la cual se reporta en las siguientes páginas.

5.5.- Procedimiento de prueba.

Antes de la realización de la prueba se verificó el funcionamiento del equipo de medición, así como de otras variables importantes para el análisis de datos, como son: la distancia entre los electrodos punta y plano, la forma del impulso y las condiciones atmosféricas, las cuales se registraron antes y después de la prueba.

En la tabla 5.1 se muestra una hoja de registro de datos que incluye las mediciones de voltaje obtenidas mediante el método "Up and down" para determinar la tensión crítica de flaneo U_{50} y su desviación estandar.

Las formas de onda de los voltajes de prueba aplicadas fueron impulsos de maniobra de 250/2500 μ s de polaridad positiva.

La prueba se inició aplicando impulsos con un valor de tensión mucho menor del voltaje de inicio de líder y después se fue aumentando con incrementos de tensión del 3%, es decir de 1.3 Kv/paso, lo cual corresponde a 24 Kv a la salida del generador de impulsos. En cada nivel de tensión se aplicaron 4 ó 5 impulsos con el fin de verificar y mejorar las mediciones.

En cada impulso aplicado se tomó un oscilograma de la señal correspondiente a la sonda de carga, además de otras mediciones registradas como: el voltaje aplicado U_a , tiempo de ruptura T_b , etc.

En total se aplicaron 65 impulsos, los datos se muestran en la tabla 5.2. Los valores de carga total Q_t , carga parásita Q_p y carga de conducción del líder Q_l , se han calculado para cada impulso, utilizando los valores de la capacitancia de medición $C_m = 5.3 \mu F$ y de la capacitancia parásita $C_p = 9.24 pF$, también se muestran en las tablas 5.2 y 5.3.

DATOS DE LA PRUEBA DE MEDICION DE LA CARGA ELECTRICA.

DATOS ELECTRICOS	
Configuración: punta-plano. Forma de onda: 250/2500 μs Polaridad: (+) Distancia: 3.6m Lugar: Irapuato, Gto. Méx. No. de pasos del generador de impulsos: 24 Eficiencia del generador de impulsos: 0.78 Capacitancia de la sonda: 5.3 μF Atenuador utilizado: 20:1	
DATOS METEREOLÓGICOS	
Temperatura bulbo seco: 31°C Temperatura bulbo húmedo: 21°C Presión: 835 mbar Humedad absoluta: 13gr/m ³ Estado del tiempo: despejado Densidad relativa: 0.84 Hora: 14:20-14:55	

METODO "UP AND DOWN"													
KV/PASO	NIVEL DE TENSION	• AGUATES x DESCARGAS											
		54.5	1016.3				X						
53.0	988.3		•		X				X		X		X
51.5	960.4	•				X		•		•		•	
50.0	932.4						•						
LECTURA DEL VOL. DE PICO	965	1030	970	967	948	966	922	985	971	1082	941	983	

Tabla 5.1.- Registro de datos.

Nº de foro	V_{00} (Vpp)	U_a (Kv)	V_{osc} (V)	V_z (Vdc)	G_1 (mA)	$\Delta \varphi$ (m)	$\Delta \varphi$ (m.c)	I_p (mA)	I_p (mA)	V_{01} (V)
1*										
2	31.9	5.97	2.2	9.4	23.3	5.5	17.8			0.67
3	32.0	5.98	2.2	9.4	23.3	5.5	17.8			0.67
4	35.5	6.66	-0.6	-1.0	-6.7	-0.9	-0.1			0.69
5	34.7	6.54	-0.5	-1.0	-5.3	-0.5	0.7			0.67
6	36.3	6.94	-0.7	1.4	15.6	1.3	21.3			0.73
7	36.0	6.75	3.8	5.6	27.7	6.5	33.5			0.70
8	37.7	7.06	3.8	7.4	29.3	6.5	33.8			0.73
9	37.7	7.06	3.0	6.0	23.4	6.5	25.3			0.73
10	37.7	7.06	3.2	6.4	23.9	6.5	27.4			0.73
11	40.0	7.49	4.1	8.0	28.5	6.9	36.6			0.78
12	40.0	7.49	2.5	6.8	26.1	6.9	32.6			0.78
13	40.0	7.49	4.0	6.4	24.7	6.9	32.6			0.78
14	40.0	7.49	4.0	6.4	24.7	6.9	32.6			0.78
15	40.0	7.49	3.8	7.6	24.2	6.9	32.6			0.78
16	41.3	7.73	5.0	10.0	32.0	7.1	45.9			0.80
17	41.3	7.73	4.3	9.2	28.9	7.1	41.7			0.80
18	41.3	7.73	4.6	9.2	28.6	7.1	41.7			0.80
19	42.5	7.97	5.3	10.6	35.2	7.4	48.8			0.85
20	42.5	7.97	5.4	10.8	37.0	7.4	49.8			0.85
21	42.5	7.97	5.7	10.0	33.0	7.4	45.6			0.83
22	43.9	8.22	4.7	10.0	27.6	7.6	40.7			0.85
23	43.9	8.22	5.2	10.4	32.1	7.6	47.5			0.85
24	43.9	8.22	5.5	11.0	33.3	7.6	50.7			0.85
25	43.9	8.22	5.5	9.0	27.7	7.6	40.1			0.85
26	43.9	8.22	5.0	10.0	28.0	7.6	45.4			0.85
27	45.2	8.46	5.5	11.0	38.3	7.8	50.5			0.88
28	45.2	8.46	5.1	10.4	34.1	7.8	46.3			0.88
29	45.2	8.46	6.2	12.4	45.7	7.8	57.9			0.88
30	45.2	8.46	6.2	13.2	47.0	7.8	58.2			0.88
31	45.2	8.46	6.2	13.2	47.0	7.8	58.2			0.88
32	45.2	8.46	6.2	13.2	47.0	7.8	58.2			0.88

Tabla 5.2.- Datos obtenidos en la medición de la carga eléctrica en la configuración punta-plano con una distancia de separación de 3.6 m, con $C_m = 5.3$ uF y $C_p = 9.24$ pF.

Nº de folio	V _{ca} (V _{eff})	U _o (V _{eff})	V _{ca} (V _{eff}) T _{ca}	V _e (V _{eff})	O ₂ (V _{eff})	ΔT (V _{eff})	Q ₂ (V _{eff})	T _e (V _{eff})	T _{ca} /T _e	V _W
33	46.5	870	5.6	11.2	59.4	8.1	51.2			0.90
34	46.5	870	6.0	12.0	63.6	8.1	55.5			0.90
35	46.5	870	5.4	11.2	67.8	8.1	59.7			0.90
36	46.5	870	5.8	11.6	71.5	8.1	63.4			0.90
37	47.8	895	6.0	12.0	75.6	8.3	67.3	160	0.64	0.93
38	47.8	895	7.5	15.0	79.5	9.3	71.2			0.93
39	47.8	895	7.9	15.8	83.3	9.3	75.0			0.93
40	47.8	895	6.0	12.0	87.6	8.3	78.3			0.93
41	49.1	919	7.6	15.2	91.9	8.5	82.4			0.96
42	49.1	919	8.2	16.4	96.4	8.5	86.9			0.96
43	49.1	919	8.8	17.6	100.9	8.5	91.4			0.96
44	49.1	919	7.5	15.0	105.4	8.5	95.9			0.96
45	49.1	919	7.5	15.0	109.9	8.5	100.4			0.96
46	50.4	943	7.5	15.0	114.4	8.7	104.8			0.96
47	50.4	943	8.4	16.8	118.8	8.7	109.2			0.96
48	50.4	943	8.4	16.8	123.2	8.7	113.6			0.96
49	50.4	943	6.4	12.8	127.6	8.7	118.0			0.98
50	51.7	968	8.0	16.0	132.0	8.9	122.4			0.98
51	51.7	968	9.2	18.4	136.4	8.9	126.8			1.01
52	51.7	968	8.5	17.0	140.8	8.9	131.2	110	0.77	1.01
53	51.7	968	11.6	23.2	145.2	8.9	135.6	150	0.69	1.01
54	51.7	968	6.8	13.6	149.6	8.9	140.0			1.01
55	51.5	964	9.0	18.0	154.0	8.9	144.4			1.01
56	53.0	992	9.5	19.0	158.4	9.2	148.8			1.01
57	50.0	956	10.0	20.0	162.8	9.2	153.2			1.03
58	51.5	964	9.5	19.0	167.2	8.6	157.6			0.97
59	51.5	964	9.6	19.2	171.6	8.9	162.0			1.00
60	51.5	964	11.0	22.0	176.0	8.9	166.4			1.00
61	53.0	992	11.5	23.0	180.4	8.9	170.8			1.00
62	51.5	964	17.0	34.0	184.8	7.7	175.2	150	0.60	1.13
63	50.0	936	8.9	17.8	189.2	6.9	179.6	220	0.58	1.00
64	50.0	936	6.7	13.4	193.6	8.1	184.0			0.97
65	50.0	936	8.9	17.8	198.0	8.6	188.4			0.97

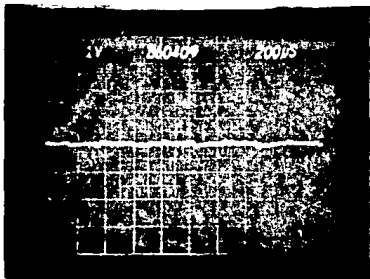
Tabla 5.3.- Continuación de la tabla 5.2.

5.6.- Oscilogramas de prueba.

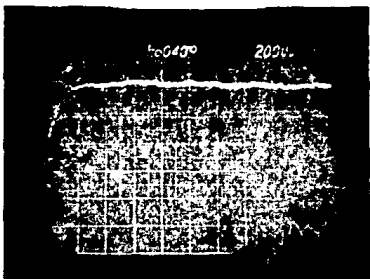
En las siguientes páginas se muestran algunas oscilogramas tomados durante la prueba anterior.

La medición de la carga se podría hacer en cualquier parte de la traza del oscilograma dependiendo del interés de estudio que se tenga sobre alguna de las etapas del desarrollo del fenómeno de la descarga.

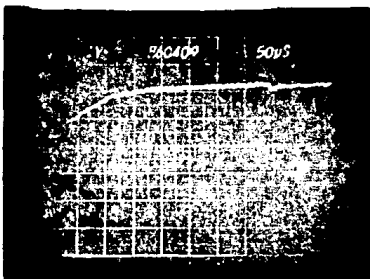
Para nuestro caso el valor que se ha tomado es el correspondiente al instante en que el voltaje aplicado alcanza su máximo o sea $250 \mu\text{s}$ ya que la forma de onda del voltaje aplicado es $250/2500 \mu\text{s}$.



FOTOGRAFIA No.1
RUIDO DE FONDO

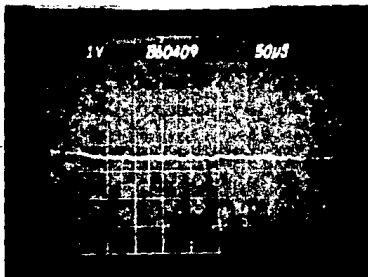


FOTOGRAFIA No.2
+597 Kv



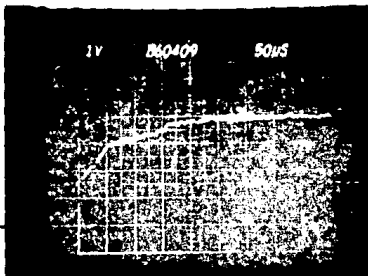
FOTOGRAFIA No.3
+598 Kv

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA



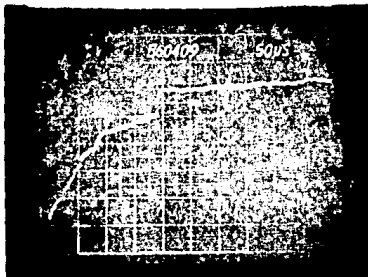
FOTOGRAFIA No.5

-594 Kv



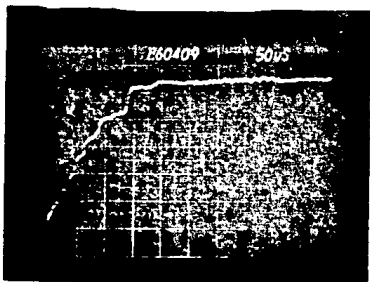
FOTOGRAFIA No.8

+706 Kv

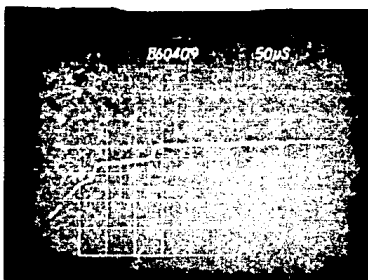


FOTOGRAFIA No.17

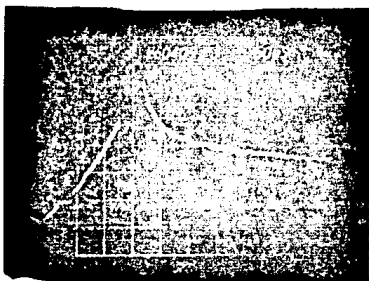
+773 Kv



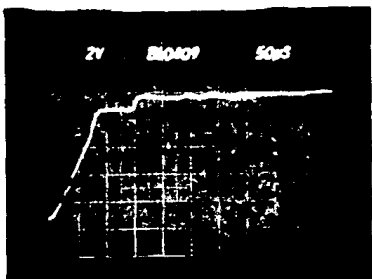
FOTOGRAFIA No.22
+797 Kv



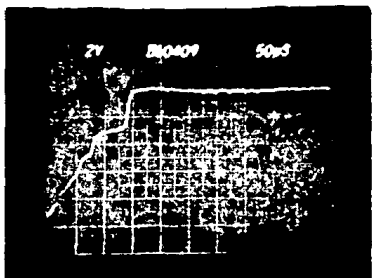
FOTOGRAFIA No.37
+895 Kv



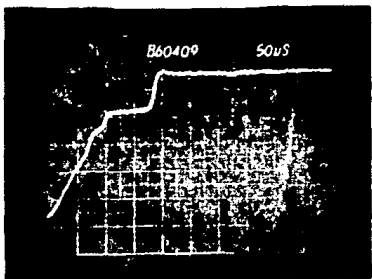
FOTOGRAFIA No.38
+895 Kv



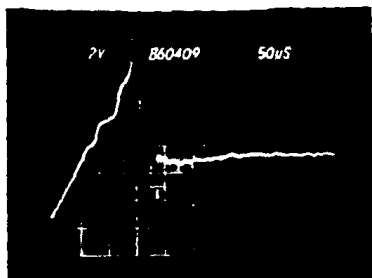
FOTOGRAFIA No.56
+992 Kv



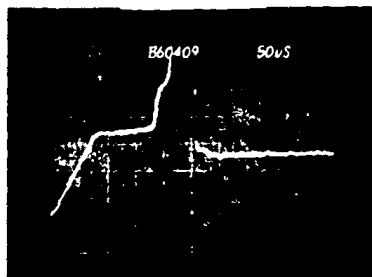
FOTOGRAFIA No.57
+936 Kv



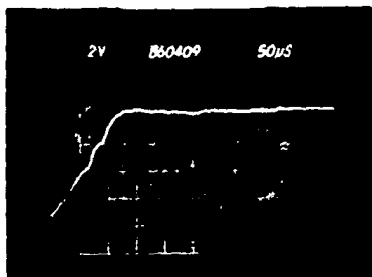
FOTOGRAFIA No.60
+984 Kv



FOTOGRAFIA No.61
+991 Kv



FOTOGRAFIA No.62
+964 Kv



FOTOGRAFIA No.63
+936 Kv

5.7.- Resultados y discusión.

De los datos obtenidos en la prueba experimental de medición de la carga eléctrica con distancia de 3.6 m., se ha hecho la gráfica 5.1 en papel semilogarítmico, en la cual se ha graficado la carga del líder Q_l en el eje logarítmico y el cociente U_a/U_{50} en el eje lineal.

Siguiendo la referencia (1) se ajustó una recta, de modo que la relación entre Q_l y U_a/U_{50} es de la forma $Q_l = B(10)^{m U_a/U_{50}}$ donde:
 $B = 1.5$ y $m = 1.75$ de modo que:

$$Q_l = 1.5 (10)^{1.75 U_a/U_{50}} \quad \text{Ec. 5.6}$$

Para los resultados de dos pruebas realizadas a diferentes distancias de separación de los electrodos también se ajustaron rectas. (Para 3.2 m, se obtuvieron 26 puntos y para 4.0 m, 15 puntos).

En la gráfica 5.2 se han colocado las rectas de las tres pruebas, en las cuales siempre se aplicaron impulsos de maniobra positivos con forma de onda estandarizada, o sea, 250/2500 μ s. Una observación de la gráfica 5.2 es que las tres rectas nos varían mucho en su pendiente, mostrando un comportamiento análogo a la referencia (1).

Otra manera de presentar los datos es la gráfica 5.3, la cual muestra que para una misma relación de U_a/U_{50} (0.9 en la gráfica 5.3), la carga se incrementa al aumentar la distancia entre los electrodos,

para el mismo tiempo de cresta del impulso aplicado.

En esta misma gráfica se incluyen los resultados de las referencias (1) y (5).

d (m)	Q (μC)	NOTA
1.5	12	Ref.(1)
3.2	41	----
3.6	55	----
4.0	67	----
4.0	32	Ref.(1)
10.0	170	Ref.(1)

Tabla. 5.1. Datos de la gráfica 5.3, tomados al 90% de U_{50} , o sea, $U_a/U_{50} = 0.9$.

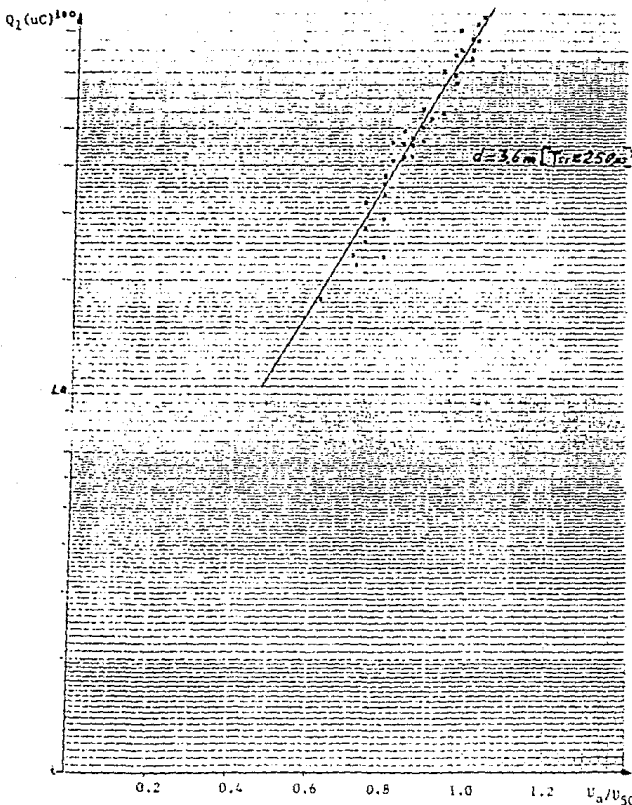
De la gráfica 5.1 se tiene que para una cierta distancia de separación de los electrodos, el logaritmo de Q , varía linealmente con la relación U_a/U_{50} , lo cual es consistente con los resultados de la referencia (1).

En la gráfica 5.2 se observa que la carga inyectada, además de ser una función de la distancia, también lo es de la densidad del aire, ya que la carga aumenta para densidades menores.

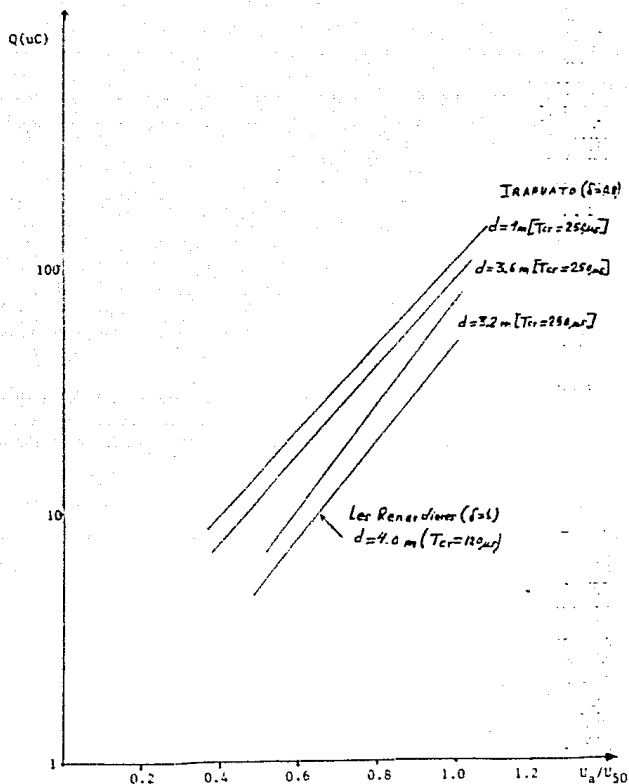
En la misma gráfica 5.2 se puede observar las rectas con $d=4\text{m}$, donde la obtenida por Les Renardieres a $\delta=1$ se encuentra por debajo de la obtenida en este trabajo. (Irapuato $\delta = 0.8$).

También se puede ver que para $d=4m$ las rectas son paralelas en primera aproximación por lo que el exponente de la ecuación de la recta no cambia con la densidad del aire, de lo cual se deduce que los cambios en la densidad del aire se manifiestan principalmente en el coeficiente B, es decir que:

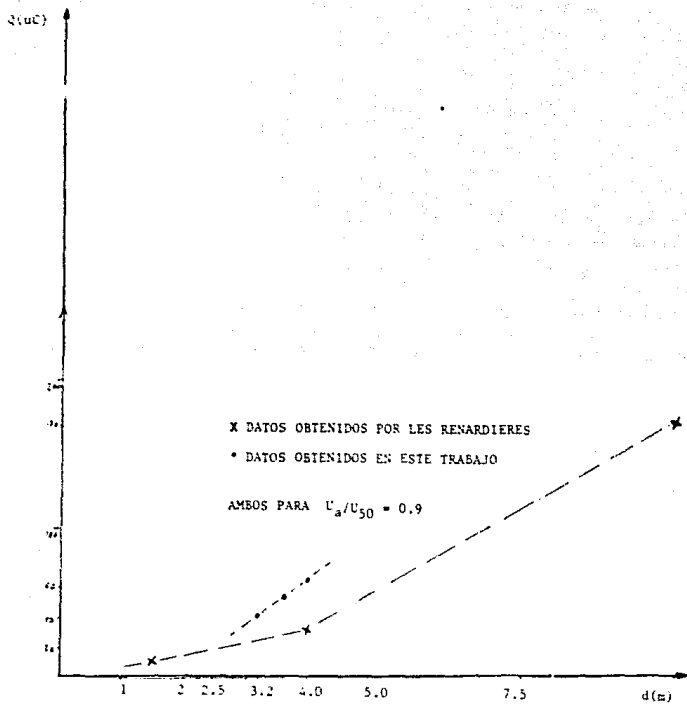
$$Q_1 = B(\delta, d) 10^{n(d)} U_a / U_{s0}$$



Gráfica 5.1.- Gráfica de la carga eléctrica en función de la relación del voltaje aplicado y el voltaje con 50% de probabilidad de ruptura, para una distancia de 3.6 m y $T_{cr} = 250$ us



Gráfica 3.2.- En esta gráfica se muestra la carga eléctrica obtenida para diferentes distancias incluyendo la obtenida por Les Renardieres.



Gráfica 5.3.- En esta gráfica se presentan los valores de carga obtenidos para diferentes distancias para un voltaje aplicado igual al 90% del voltaje U_{50} .

CAPITULO 6

6.1. - Transductor para la medición del campo eléctrico.

La medición del campo eléctrico sobre la superficie de electrodos es tan importante como las mediciones de carga eléctrica, corriente eléctrica y voltaje eléctrico, para poder hacer un estudio más completo de la descarga eléctrica.

Además de que el conocimiento de la intensidad del campo eléctrico, es de considerable interés en muchas aplicaciones industriales en que intervienen altos voltajes.

Investigadores de algunos países han construidos diferentes tipos de sondas para la medición de campo, sin embargo, se presentan algunos inconvenientes; como podría ser que la propia sonda perturbe la distribución del campo ó que posea un tiempo de respuesta deficiente. Otro inconveniente es la precisión en la medición.

En este trabajo se presenta un reciente tipo de sonda la cual se espera que supere todos los inconvenientes anteriores e inclusive tenga algunas ventajas como el de ser utilizada en la zona activa de la descarga, es decir, en el extremo del electrodo energizado o bien en el electrodo aterrizado.

Además de ser de construcción simple puede ser utilizada para registrar cambios lentos o rápidos de campo eléctrico en electrodos de geometría diversa.

En el tiempo destinado para la realización de este trabajo no se logró terminar la construcción total de la sonda por lo que no se hicieron pruebas preliminares, de modo que solamente se presentan los conceptos básicos en que se basa el diseño de la sonda así como esquemas y dibujos constructivos y su incorporación al circuito de prueba.

6.2.- Principio de funcionamiento de la sonda de campo.

El principio del funcionamiento de la sonda de campo esta basada en la penetración de las líneas del campo eléctrico a través de orificios hechos en una pequeña sección de la superficie del electrodo, de tal forma que las líneas de campo lleguen hasta un sensor colocado dentro del electrodo.

Para una mejor explicación se presenta la siguiente figura 6.1 en la cual aparecen dos placas conductoras de grosor t y separadas una distancia g . En la superficie de la placa B es en la que se requiere determinar el campo eléctrico.

La placa B contiene una apertura circular por la cual penetra el campo causando una inducción de carga en la placa A que actua como sensor.

La señal que se registra en el sensor es proporcional al campo en la superficie del electrodo y esta en función de la densidad de carga inducida y de la capacitancia C_s . Para prevenir que la corriente de conducción alcance el sensor se aplica un campo inverso entre el sensor y el electrodo. Este campo inverso no afecta el proceso de inducción de carga de modo que la acción primordial de la sonda es la de filtrar las líneas del campo E y de evitar cualquier otra componente que no sea perpendicular al sensor.

Para lograr esta filtración se requiere que el valor mínimo del campo de polarización E_b , sea mayor que el valor máximo del campo atenuado, o sea:

$$E_a \text{ max.} < E_b \text{ mín.}$$

A esta expresión se le conoce como condición de corte.

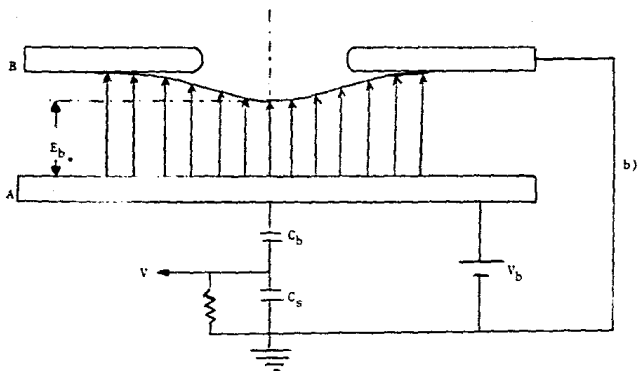
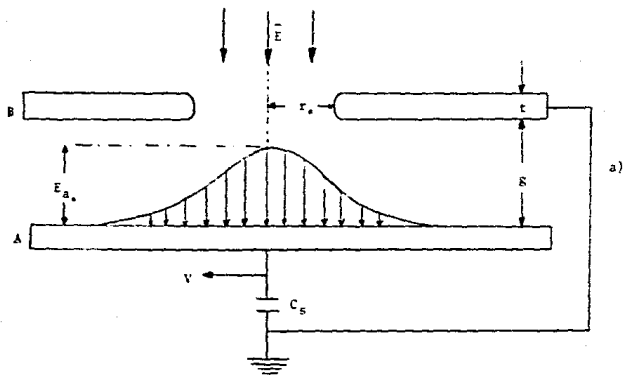


Fig.6.1.-Esquema de la sonda de campo.

a). Presenta el campo de penetración E_a .

b). El campo atenuador E_b .

La sensibilidad de la sonda depende de la razón r_0/g la cual involucra la cantidad de penetración del campo, ya que r_0 corresponde al radio del orificio. Entonces la sensibilidad expresada en términos de la carga inducida por unidad de campo externo es:

$$S = \frac{2\pi E_0}{E} \int E_r dr$$

Así pues, un aumento en la razón r_0/g incrementará la sensibilidad, aunque se tendría un inconveniente mayor con el campo de polarización, por lo que es importante establecer una óptima relación entre la sensibilidad y el voltaje de polarización, dependiendo a su vez del orden de magnitud del campo que se va a medir.

Con la intención de asegurar que la superficie del electrodo fuese afectada lo menos posible, se escogieron orificios circulares para la sonda ya que ésta forma parte del electrodo, además de que se simplifica el cálculo del campo eléctrico debido a la simetría axial de los orificios circulares.

6.3.- Diseño y construcción de la sonda de campo.

El transductor para la medición del campo eléctrico consiste como ya se mencionó anteriormente, de dos placas, una que por su función llamaremos filtro B y a la otra sensor A.

Para registrar la señal que se induce en el sensor se ha colocado un capacitor Cs conectado en serie con la placa sensor, de tal manera que la señal en el capacitor es directamente proporcional al campo en la superficie del electrodo.

Según los cálculos realizados en arreglos geométricos semejantes a la configuración punta-plano, el voltaje en el sensor es del orden de 30mV aproximadamente por lo que se ha incluido en la sonda un circuito amplificador para lograr una mejor relación señal-ruido en el instrumento de registro, colocado en la caseta de control la cual está colocada a una distancia de 80 m. de la configuración punta-plano.

Por otra parte, considerando que durante la prueba existe una fuerte interferencia radiada, se le ha provisto a la sonda de un doble blindaje que consiste en un cilindro y una caja de cobre. Para la medición se hará primeramente con un cable coaxial y en caso de presentarse algún problema con la interferencia se utilizará el mismo sistema de transmisión con cable de fibra óptica que en la medición de la carga eléctrica el cual según sus características, permite una mayor precisión en la medición.

Para el diseño del circuito amplificador se calcularon los siguientes parámetros en función de los requerimientos eléctricos y de los componentes utilizados.

CARACTERISTICAS DEL AMPLIFICADOR.

- Tensión máxima de la señal de entrada: 65 mV.
- Impedancia de entrada: $11M\Omega$, 250pF
- Alimentación: ± 12 V
- Ganancia: 20
- Ancho de banda (-3db): 5MHz
- Blindaje: cilindro de cobre
- Polarización de las placas: 0-100 V
- Fuente de polarización. Remota

Respecto a la fuente para la aplicación del campo de polarización, ésta se colocará en la caseta de control (caseta metálica) para desde ahí poder seleccionar el voltaje de polarización que se requiera, pues antes de aplicar el campo de polarización es necesario hacer algunas mediciones sin polarización de las placas para después en función de dichas mediciones seleccionar el voltaje que sea requerido, es por esto que la fuente de polarización debe colocarse en la caseta de control para su operación.

La alimentación del amplificador colocado en la sonda podría hacerse de dos formas, ya sea por medio de una batería incluida en la caja blindaje de la sonda o bien por medio de un cable proveniente desde la caseta de control, esta elección se hará en función de la facilidad práctica que presente alguna de las dos opciones.

A continuación se presenta el diagrama del circuito amplificador para la sonda.

Para la elección de las dimensiones de la sonda así como de las placas, filtro y sensor se hicieron varios cálculos y los resultados obtenidos aparecen en las tablas 6.1, 6.2, y 6.3. También se dan los cálculos teóricos que se obtuvieron de algunos parámetros de interés, como son: la sensibilidad, el voltaje que se espera medir en el sensor, además de otras variables, las cuales en su mayoría dependen de las características geométricas del filtro y del sensor.

De mayor importancia para la medición del campo eléctrico son, el diámetro de los orificios, el grosor de las placas y la separación entre ellas, el área total de penetración, así como el área total del sensor. En dichas tablas, los resultados se han obtenido considerando que la placa filtro presenta 19 orificios y en cada una de las tablas se utilizó uno de los tres valores de campo eléctrico obtenidos teóricamente de las configuraciones que más se aproximaron a las circunstancias reales, tomando en cuenta una distancia de 4m. de separación de los electrodos de la configuración punta-plano.

En resumen, los datos geométricos para la construcción de la sonda fueron:

- r_o: radio de los orificios = 1.6 mm.
- g: separación de las placas = 1 mm.
- t: grosor de las placas = 2 mm.
- r_s: radio de la placa sensor = 4.5 cm.
- N: Número de orificios = 19
- r_f: radio de la placa filtro = 6.5 cm.

Con estos valores se obtuvieron los siguientes datos:

- A_s: Área del sensor = 254.5 cm²
- A_f: Área del filtro = 531 cm²

Después de las tablas se presentan los dibujos de las piezas principales de la sonda de campo.

V_0/g	V_0/E (V/KV/cm)	V_b (V)	S_1 $\frac{Q_1}{E} \left(\frac{pC}{KV/cm} \right)$	Q_1 (pC)	V_1 (mV)	$\frac{Q_1}{C_m}$ (mV)	Q_1 (pC)	V_{11} (mV)	$\frac{Q_1}{C_m}$ (mV)
0.5	3.3	0.165	0.133	2.0067	0.5335	2.547	0.126	0.652	1.7
1.0	2.0	0.95	0.371	0.015	0.075	27.1	0.134	1.925	23.5
1.5	14.3	0.715	0.253	0.2256	0.113	2.457	2.930	0.15	43
2.0	12.3	0.715	0.566	2.0283	0.142	10.157	2.557	2.7	54

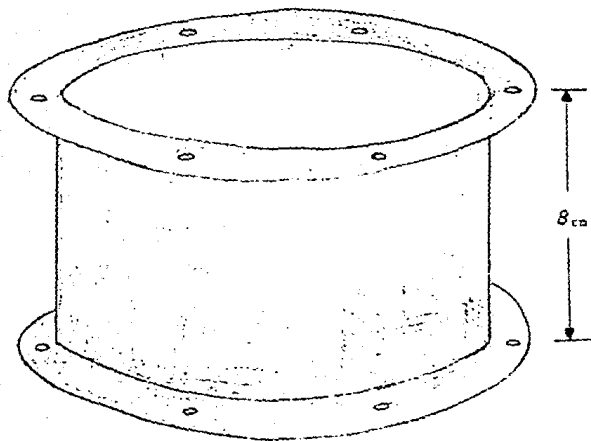
Tabla 6.1.-Cálculo para un campo eléctrico $E = 0.05 \text{ KV/cm}$ con $C_m = 200 \text{ pF}$ y $t = 1 \text{ mm}$
 E : campo eléctrico aplicado, C_m : capacitor de medición, t : grosor de las placas del transductor
 r_0 : radio de los orificios, g : separación de las placas, E_0 : campo eléctrico atenuado por la geometría del transductor), V_b : tensión de polarización, S_1 : sensibilidad para un solo orificio,
 Q_1 : carga inducida a través de un solo orificio, V_1 : voltaje para un solo orificio.

γ_0/g	V_b/E (V/kv/cm)	V_b (V/cm)	S_1 (pC/ μm^2)	Q_1 (pC)	v_1 (μm)	S_{19} (pC/ μm^2)	Q_{19} (pC)	V_{19} (V)	V_{19}/E (mv/kv/cm)
0.5	2.3	1.99	0.133	2.0593	0.19	1.712	1.958	3.79	1.63
1.0	2.0	2.70	0.311	0.0933	5.45	7.9	1.716	8.58	35.1
1.5	19.5	9.01	0.453	0.136	0.58	2.042	0.552	10.71	43.05
2.0	18.3	5.99	0.566	0.169	0.845	10.957	3.226	16.13	53.74

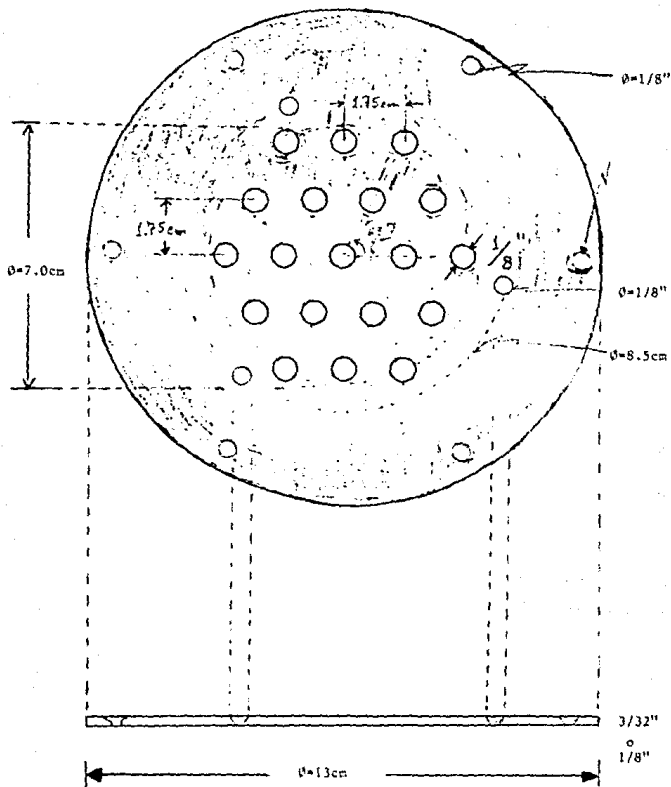
Tabla 6.2.- Cálculos obtenidos para los siguientes valores; $E = 0.3 \text{ Kv/cm}$, $C_m = 200 \text{ pF}$ y $t = 1 \text{ mm}$, S_{19} : sensibilidad para 19 orificios, Q_1 : carga para 19 orificios, V_{19} : voltaje para 19 orificios, E_a : campo eléctrico atenuado, E_b : campo eléctrico de polarización.

V_0/E	V_0/E (V/cm)	V_0 (V)	Δ (pC/cm ²)	Q (pC)	V_1 (V)	S_{11} (pC/cm ²)	S_{12} (pC/cm ²)	V_{11} (V)	V_{12}/E (V/cm)
0.5	3.3	9.75	0.133	0.199	1.995	2.522	3.790	18.952	12.63
1.0	4.0	13.5	0.133	0.451	2.555	5.719	6.595	42.892	26.59
1.5	4.8	21.75	0.133	0.679	3.375	8.607	12.910	64.55	43.035
2.0	18.3	27.45	0.500	0.849	4.845	10.754	16.131	80.555	53.77

Tabla 6.3.- Cálculos obtenidos para los siguientes valores; $E = 1.5 \text{ Kv/cm}$, $C_{22} = 200 \text{ pF}$
y $t = 1 \text{ mm}$.



Dibujo del blindaje de la sonda de campo para evitar la interferencia electromagnética.



Dibujo del disco sensor de la sonda para la medición del campo eléctrico; hecho de una placa de cobre.

6.4.- Instalación y equipo propuesto para las pruebas de medición del campo eléctrico.

Para las pruebas de medición de campo se utilizará la misma configuración punta-plano de las pruebas de medición de carga y el mismo equipo de medición tradicional para las variables de tiempo al corte y forma de onda. Para la aplicación del voltaje se utilizará el generador de impulsos de 4.8 MV.

El nivel de tensión de los impulsos estará en el mismo intervalo utilizado en la medición de carga o sea entre 600 y 1500 KV, esto con el fin de poder apreciar alguna relación entre el campo eléctrico y la carga eléctrica para un mismo valor de voltaje del impulso aplicado, ya que en ambas pruebas la forma del impulso es constante (impulso de maniobra estandar, es decir 250/2500 μ s).

La distribución del equipo es similar al segundo arreglo utilizado para la medición de carga, ver la siguiente fig.6.2, de tal manera que en la caseta metálica se encuentra la consola de control del generador, el osciloscopio de impulsos, el volmetro de pico y parte del sistema de medición incluido para la sonda de campo.

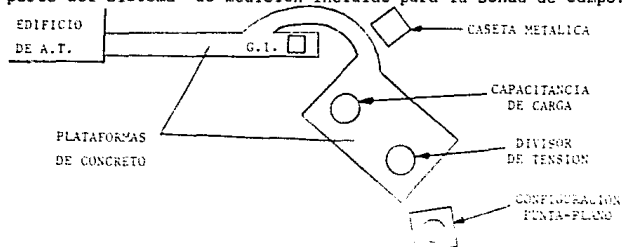


fig.6.2.- Esquema de colocación del equipo experimental.

Tomando en cuenta que la medición del campo se hará en la superficie del plano, en la figura 6.3 se muestra el circuito de prueba incluyendo los aparatos de medición.

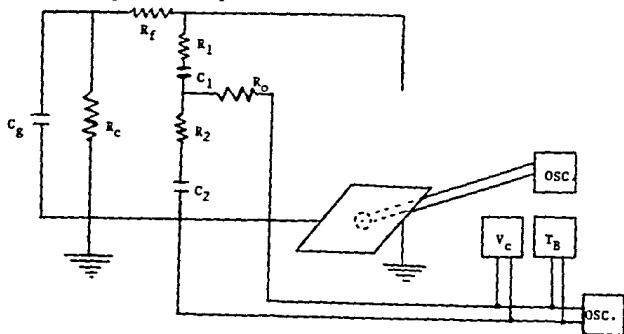


fig.6.3. Circuito de prueba.

Para la colocación de la sonda de campo se hará un hueco en el piso, justamente debajo del centro del plano, procurando que la caja de blindaje exterior de la sonda quede al ras con la superficie del plano. El detalle de la colocación se muestra en la fig.6.4.

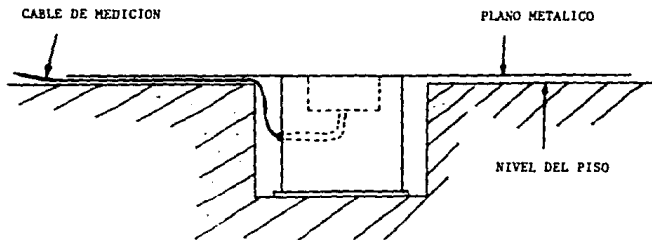


fig.6.4.- Colocación de la sonda.

CONCLUSIONES.

Como se mencionó al inicio de este trabajo, para el estudio de la descarga eléctrica se fijó el interés de conocer el comportamiento de la carga y el campo eléctrico durante el desarrollo de la descarga, para lo cual se construyeron dos sondas.

Con la sonda para la carga eléctrica se logró registrar con bastante claridad el oscilograma esperado, es decir, la forma de onda de la carga eléctrica.

El equipo de transmisión con cable de fibra óptica utilizado en el sistema de medición de la carga eléctrica fué determinante para lograr las mediciones de carga eléctrica y de la capacitancia parasita, las cuales estuvieron bastante aproximadas a los valores obtenidos teóricamente.

Del análisis teórico y experimental realizado sobre el comportamiento de la interferencia que se genera durante un impulso, así como su influencia sobre el equipo de medición, permitió encontrar solución a los problemas que se presentaron, utilizando blindajes y otras técnicas de protección de la interferencia en aquellos aparatos que así lo requerían.

De los resultados experimentales se concluye que existe una relación exponencial entre la carga inyectada Q_i y el cociente U_a/U_{so} ,

la relación obtenida para una distancia de separación entre los electrodos de 3.6m. fué:

$$Q_1 = 1.5(10)^{1.75U_a/U_{50}}$$

Se obtuvo el mismo tipo de relación $Q_1 = B(10)^{aU_a/U_{50}}$ para las distancias de separación entre electrodos: 4.0 m., 3.6 m., y 3.2 m. (ver gráfica 5.2), en dichas pruebas se aplicaron siempre impulsos de maniobra positivas de forma estandar, es decir, 250/2500 μ s.

Se observó que las rectas obtenidas en este trabajo y comparadas con Les Renardieres no varían mucho en su pendiente por lo que en primera aproximación pueden considerarse como rectas paralelas.

De lo anterior se concluye que la pendiente no es afectada por la variación en la altitud y que en el caso de la ordenada al origen B, depende en gran parte de la altitud o sea la densidad del aire δ así como de la distancia de separación de los electrodos d. (ver gráfica 5.2) ya que se obtuvieron diferentes ordenadas al origen para cada distancia entre electrodos.

En la misma gráfica 5.2 se han colocado las rectas con $d=4$ m. $d=3.6$ m. y $d=3.2$ m. correspondientes a este trabajo y la otra a Les Renardieres y se puede observar que no varían mucho en su pendiente, de ellas se concluye que la carga inyectada Q_1 además de ser función de la distancia d, lo es también de la densidad del aire, ya que la carga Q_1 es mayor para $\delta=0.8$ (Irapuato, Gto. Méx.) que para $\delta=1$ (Francia). Es decir que Q_1 varía inversamente proporcional con la densidad del aire.

De la gráfica 5.3 en la cual se hizo una comparación de los valores de carga inyectada para varias distancias entre electrodos, considerando los valores obtenidos en este trabajo y de Les Renardieres tomados al 90% de U_{50} , se observa también el hecho que los valores obtenidos en este trabajo están por arriba de Les Renardieres, lo cual se debe a la diferencia de altitudes como ya se dijo anteriormente. Otro aspecto que se observa es que hay un incremento uniforme de la carga inyectada Q_i conforme se aumenta la distancia d , entre los electrodos, para el trabajo hecho en Irapuato, Gto. Méx. y para el caso de Les Renardieres (Francia), se aprecia que hay incremento brusco, lo cual puede atribuirse a la forma de onda de los impulsos aplicados en su trabajo, que fueron impulsos con tiempo de cresta T_{cr} desde 22 μs hasta 2200 μs y por lo tanto la carga inyectada Q_i es también función del tiempo de cresta T_{cr} del impulso aplicado.

Respecto al dispositivo de medición de carga su funcionamiento no depende del tipo de configuración que se desee analizar, solamente hay que adaptarla al lugar o aparte del electrodo donde se quiere hacer la medición.

El tamaño y la forma de la sonda quedan en función del espacio disponible en el interior del electrodo y para las características eléctricas se requiere determinar los niveles máximos y mínimos de voltaje a los que va a estar sometida.

En el caso de la sonda para la medición del campo eléctrico, se avanzó en los cálculos teóricos para determinar las magnitudes de capacitancia y campo eléctrico en los electrodos, y fueron de gran ayuda para seleccionar las características geométricas y eléctricas de

la sonda, lo que permitió la construcción de ésta, aunque no se llegaron a hacer las mediciones por varias circunstancias.

Proyección del trabajo futuro

Como se ha presentado en este trabajo, mediante el uso de sondas es posible planear un estudio más sistemático y completo del fenómeno de la descarga eléctrica en aire, ya que permiten analizar un mayor número de variables simultáneamente, durante la aplicación de un solo impulso.

Para lo anterior es necesario la implementación de transductores y de equipo moderno para el análisis de otras variables que aún faltan por registrar como son la corriente eléctrica o bien los aspectos luminosos de los streamers y el líder. También se requiere de los recursos humanos así como del apoyo por parte de las instituciones interesadas en este tipo de estudios ya que los instrumentos para hacer investigación sobre el campo de la Alta Tensión son sumamente costosos.

Posterior al trabajo desarrollado en esta tesis, se continúa con el estudio de la descarga, incluyendo el avance del líder, captado con un convertidor de imágenes y sincronizado con la medición de carga en una instalación de pruebas provisional a mayor altitud (14). Esto con

el fin de encontrar la dependencia de la carga eléctrica con la humedad y la densidad del aire, ya que son las variables que caracterizan la influencia de las condiciones atmosféricas sobre el desarrollo de la descarga eléctrica en aire.

A continuación se presentan algunas proposiciones de tácticas de estudio de interés para la continuación del estudio de la descarga eléctrica en aire:

- Realizar pruebas de medición de la carga eléctrica en la configuración punta-plano considerando distancias similares a las de otros trabajos que se hayan hecho y comparar los resultados, tomando en cuenta las condiciones atmosféricas.

- Proponer criterios para extrapolar los resultados hacia otras configuraciones.

- Extender este tipo de estudio a otras configuraciones y también utilizar la mayor cantidad de equipo de medición para obtener mayor información en cada impulso aplicado, por ejemplo: además de utilizar el sistema de medición convencional, el cual registra el voltaje aplicado, el tiempo a la ruptura y la forma de onda del impulso aplicado, también se podría utilizar simultáneamente la sonda de carga eléctrica, la sonda de campo eléctrico, la sonda de corriente eléctrica así como la aplicación de cámaras fotográficas para registrar la trayectoria del líder, un convertidor de imágenes, etc.

De todo lo anterior se aprecia que una de las acciones más inmediatas a seguir es la creación e innovación de varios aparatos que

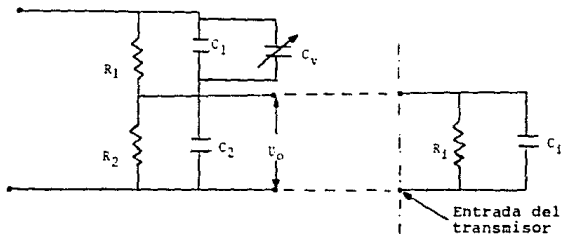
permitan mejorar los conocimientos de las magnitudes de interés en el estudio de la descarga eléctrica en aire, ya que un conocimiento más aproximado al comportamiento del desarrollo de la descarga permitirá mejorar la tecnología de diseño y funcionamiento de equipo eléctrico, aumentando la eficiencia y confiabilidad en el servicio del sistema eléctrico, esto en beneficio de los usuarios tanto del sector público como del sector industrial.

Atenuador de acoplamiento al sistema de medición.

El atenuador externo es utilizado para adaptar el nivel de voltaje de la señal que se desea transmitir, al nivel de entrada del transmisor que es de ± 1 volt. las características generales del atenuador son las siguientes:

- Tensión máxima de entrada en servicio continuo: 200 Vrms.
- Tensión máxima de impulso: 2 KV.
- Ancho de banda (3db): DC - 5 MHz.
- Relación de atenuación: 10/1, 20/1, 50/1, 100/1
- Precisión de la relación de atenuación: $\pm 0.5\%$
- Conector de entrada: Triaxial LEMO RA 2550
- Conector de salida: Triaxial LEMO RAC 2550

El circuito del atenuador consiste de un divisor del tipo capacitivo-resistivo como se muestra en el esquema siguiente:



La relación de atenuación esta dada por:

$$K = \frac{R_1(R_2 + R_1) + R_2R_1}{R_2R_1} \implies K = 1 + \frac{R_1 + (R_2 + R_1)}{R_2R_1}$$

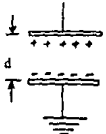
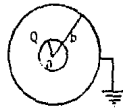
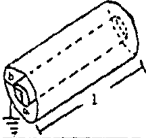
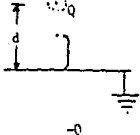
Con R_1 : Resistencia de entrada del transmisor.

En paralelo con la capacitancia C_1 se encuentra un condensador variable C_v cuya acción es la de compensar el efecto de la capacitancia parásita y de mantener la relación de atenuación constante en el límite superior del ancho de banda.

APENDICE 2.

En este apéndice se presentan los cálculos de capacitancia y campo eléctrico de diferentes arreglos geométricos. Estos cálculos se realizaron para tener una idea del orden de magnitud de dichos variables (se presenta una tabla de los cálculos obtenidos), posteriormente en base a los valores obtenidos, se determinaron las demás características eléctricas de las sondas de carga y campo eléctrico.

Los arreglos que más semejanza tienen con la configuración punt-plano son los de esferas concéntricas y el de carga puntual, es decir, el método de imágenes. Los valores obtenidos con estos arreglos coincidieron bastante con la capacitancia parásita C_p que se registró.

MODELO	CAPACITANCIA	CAMPO ELECTRICO	DATOS UTILIZADOS
	$C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$ $C = 221.5 \text{ pF}$	$E = \frac{V}{d}$ $E = 3.25 \text{ Kv/cm}$	$V = 1300 \text{ Kv}$ $d = 4 \text{ m}$ $A = 100 \text{ m}^2$
	$C = \frac{4\pi\epsilon_0 a b}{b-a}$ $C = 5.637 \text{ pF}$	$E = \frac{V a b}{r^2(b-a)}$ $E = 0.041 \text{ Kv/cm}$	$V = 1300 \text{ Kv}$ $r = b = 4 \text{ m}$ $a = 0.05 \text{ m}$
	$C = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln b/a}$ $C = 127.05 \text{ pF}$	$E = \frac{V}{r \ln b/a}$ $E = 0.7416 \text{ Kv/cm}$	$V = 1300 \text{ Kv}$ $r = b = 4 \text{ m}$ $a = 0.05 \text{ m}$ $l = 10 \text{ m}$
	$C = 2\pi\epsilon_0 d \left(\frac{1 - \frac{d}{b}}{\frac{d}{b}} \right)$ $C = 5.6 \text{ pF}$	$E = V/d \left(\frac{1 - \frac{d}{b}}{\frac{d}{b}} \right)$ <p>con $(y) = y/d$ para $= 0.987$ $E = 0.0797 \text{ Kv/cm}$</p>	$V = 1300 \text{ Kv}$ $d = 4.05 \text{ m}$

Valores de campo eléctrico en el electrodo aterrizado para diferentes configuraciones.

REFERENCIAS

- 1.- Le Group Les Renardieres. Rechercher sur l'amorçage des grands intervalles d'air aux Renardieres.
Resultats de 1973. ELECTRA No. 35.
- 2.- G. Carrara y L. Thione. Switching surge strength of large air gaps: a physical approach. Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano.- CESI G.M. Pub. N. 75/6. Milano, Italy.
- 3.- Norma IEC-60-2.
- 4.- R. Brambilla, E. Garbagnati, A. Bertazzi, F. Galluci y A. Pignini. Switching impulse test at very low probability levels. ENEL-ITALY. CESI-ITALY.
- 5.- G. Baldo. Basic aspects of the physics concerning the development of long sparks in air. Istituto di Elettrotecnica e di Elettronica, Universita di Padova, Italy.
- 6.- Manual del Sistema de Fibra Optica. Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano. CESI.
- 7.- High voltage test systems. ASEA HAEFELY MICAFIL.
- 8.- Adolf J. Schwab. High-voltage measurement techniques.
- 10.- Specialization courses on laboratory techniques high-voltage testing.

- 11.- W. Brian Stark, Elsayedo Selim y Ronald T. Waters. Field-filters probes and the measurement of alternanting current corona. IEEE Transactions on industry application, Vol. IA-16, No. 3 May/June, 1980.
- 12.- R. T. Waters. Electric field measurement in steady-state and transient discharges. XVth Ing. Conf. Ion. Phen Gases; Minsk, USSP July 12th-19th, 1981. UWIST, Cardiff.
- 13.- Ronald T. Waters, E.O. SELIM, Field-filters-New static probes for field measurement at electrodes. University of Wales Institute of Science and Technology, Cardiff, U.K. Third International Symposium on High Voltage Engineering. Milán 28-31 Agosto de 1979.
- 14._ M.Ramírez, M.Moreno, A.Pigini, G.Rizzi, E.Garbagnati. Influencia de la densidad del aire sobre la rígidez dielectrica del aislamiento externo bajo impulsos positivos. Investigación experimental hasta una altitud de casi 3000 msn.