

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ESPINTERÓMETRO PARA UN GENERADOR DE IMPULSO DE ALTA TENSIÓN

### RESUMEN

Este trabajo presenta el procedimiento seguido para diseñar y construir un espinterómetro para un generador de impulsos de tensión de 140 kV., dividiéndose en tres etapas principales. La primera, la concepción del dispositivo, llevada a cabo empleando técnicas de Concepción Asistida por Ordenador (C.A.O.) con un programa de simulación que aplica el Método de Elementos Finitos (M.E.F.). La segunda, la construcción del dispositivo, consistente en la selección técnico-económica de los materiales, el desarrollo de una estructura mecánica confiable y el ensamble de todas las partes. Finalmente las pruebas al dispositivo, las cuales permitieron evaluar su desempeño de acuerdo con estándares internacionales.

**PALABRAS CLAVES:** Espinterómetro, técnicas en alta tensión, impulso tipo rayo.

### ABSTRACT

*This paper presents the procedure that was followed to design and build a sphere gap for a 140 kV impulse voltage generator for educational purposes.. It was divided into three main stages. The first one, the conception of the device, was carried out by using Computer Aided Design (C.A.D.) techniques with a simulation package that applies the Finite Element Method (F.E.M.). The second stage, the construction of the device, involved a technical-economical choice of the materials, the development of a reliable mechanical structure and the assembling of all the pieces. Finally, the test of the device, allowed us to determine the performance of the prototype according to international standards.*

**KEYWORDS:** Spark gaps, high voltage techniques, lightning impulse.

### \*DUVIER BEDOYA BEDOYA

Ingeniero Electricista Universidad Nacional de Colombia – Manizales.  
duvier@universia.net.co

### \*FRANCISCO ABEL ROLDAN

Ingeniero Electricista U.T.P.  
D.E.A. Génie Électrique I.N.P.G.  
Profesor Asistente Universidad Nacional de Colombia – Manizales.  
froltan@nevado.manizales.unal.edu.co

### \*\*FERNANDO A. HERRERA

Ingeniero Electricista Universidad Nacional de Colombia – Bogotá.  
M.Sc. U.N. Bogotá.  
Profesor Asistente Universidad Nacional de Colombia – Bogotá.  
fernando.herrera@gelvez.com

\* **Grupo de Redes de Distribución y Potencia – Universidad Nacional de Colombia – Manizales.**

\*\* **L.A.B.E Laboratorio de ensayos Eléctricos Industriales. Universidad Nacional de Colombia Bogotá**

## 1. INTRODUCCIÓN

El espinterómetro es un elemento constitutivo de los generadores de altas tensiones o altas corrientes. Este permite ser usado a la vez como interruptor o instrumento de medida. Como interruptor, desencadena la onda de impulso la cual puede ser plena o recortada y como instrumento de medida, permite conocer el nivel de tensión al cual dicha onda es generada y/o recortada.

El espinterómetro es en esencia un arreglo de dos electrodos los cuales pueden variar su separación. Dichos electrodos se someten a una diferencia de potencial la cual asocia un campo eléctrico homogéneo entre los mismos. Para lograr tal distribución de campo el arreglo de electrodos más favorable es el arreglo de esferas.

## 2. DISEÑO

Se dispone de una fuente de 140 kV lo que asocia según IEEE Std 4 – 1995 unos electrodos de 12,5 cm de diámetro, según tablas de tensión disruptiva V50%. [4,15]

### 2.1 Selección de la geometría

Para la tensión de trabajo establecida, se selecciona un encapsulado cilíndrico, debido a la simetría de campo alrededor de los electrodos, Figura 1, disponiéndose de ventanas en la región interelectródica para la visualización de la descarga.

Teniendo en cuenta que el espinterómetro se ensambla en un “proto-board” de alta tensión, su longitud se selecciona de 66 cm, la cual es la dimensión estándar de todos los elementos que allí se conectan.

Aunque es posible utilizar placas o perfiles de Rogowski para construir un arreglo de electrodos que produzcan descargas en campo eléctrico homogéneo, es el arreglo de esferas el más recomendable para este propósito. Los primeros presentan grandes concentraciones de campo en sus extremos a altos niveles de tensión, mientras que el arreglo de esferas garantiza campo eléctrico homogéneo siempre y cuando la distancia entre las esferas no supere su radio, existiendo así un diámetro definido para cada nivel de tensión.

Como la descarga se produce en la región en la cual se enfrentan ambos electrodos, sin perjuicio de su desempeño, se emplean semiesferas, por demás huecas, debido a los bajos niveles de corriente que se manejan, disminuyéndose así el peso y el material utilizado en las mismas.

Cada semiesfera está sujeta a un soporte denominado trípode portaelectrodo. El portaelectrodo A, tiene 6 cm de longitud garantizando el desplazamiento de este electrodo en los límites de las ventanas para la visualización de la descarga. El portaelectrodo B, tiene 10 cm de longitud para facilitar la instalación posterior de un dispositivo de disparo ("trigger") para generar descargas controladas.

## 2.2 Soporte mecánico

Consta de dos sistemas, uno móvil y otro fijo, Figura 1. El sistema mecánico móvil sujeta al portaelectrodo A y el sistema mecánico fijo sujeta al portaelectrodo B.

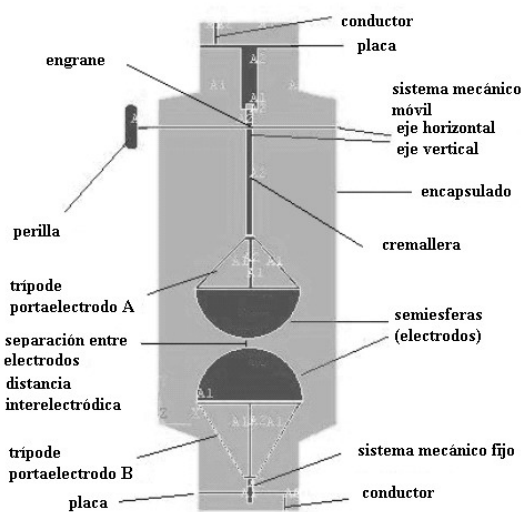


Figura 1. Concepción del dispositivo

El sistema mecánico móvil consiste en una cremallera de 15 cm de longitud y 35 dientes para garantizar movimientos pequeños a la vez. Esta cremallera se encuentra emplazada en un engrane conectado con un eje horizontal accionado manualmente mediante una perilla.

Para una mayor facilidad de movimiento, el eje horizontal se apoya sobre dos bujes ubicados en el encapsulado.

Debido al peso de las semiesferas y con el propósito de dar una alta estabilidad al sistema mecánico móvil completo, el eje vertical en su extremo superior se inserta en un cilindro prisionero sujeto a una placa, garantizándose así, su movimiento en sentido axial más no pendular al variar la separación entre semiesferas. Dicha placa se conecta al electrodo terminal a través de un alambre conductor.

## 2.3 Consideraciones de campo eléctrico

Las consideraciones de campo determinan el dimensionamiento adecuado del encapsulado, Figura 1, este,

no debe alterar la homogeneidad del campo en las condiciones de trabajo más exigentes presentadas cuando se tienen las semiesferas con la máxima tensión y la máxima separación.

Para evaluar el comportamiento del campo eléctrico se efectuó un análisis electrostático por medio del software ANSYS [13] que aplica el método de elementos finitos, calculando parámetros tales como: intensidad de campo eléctrico, distribución de líneas de campo y distribución de líneas equipotenciales.

La simulación electrostática en ANSYS considera los siguientes pasos: determinación de la geometría, selección de las propiedades eléctricas de los materiales (permitividad y conductividad), determinación del mallaje, aplicación de las condiciones de frontera, solución y obtención de resultados.

Una vez introducida la geometría al programa y asignadas las propiedades eléctricas de los materiales se procede a enmallar el dispositivo refinando el mallaje en la región interelectródica donde debe presentarse la descarga, Figura 2. En seguida se aplican las condiciones de frontera, seleccionando la máxima tensión de funcionamiento entre electrodos (140 kV) para diversas separaciones de los mismos.

Finalmente se efectúa la solución del problema para cada separación interelectródica y se extraen los valores de los parámetros arriba mencionados.

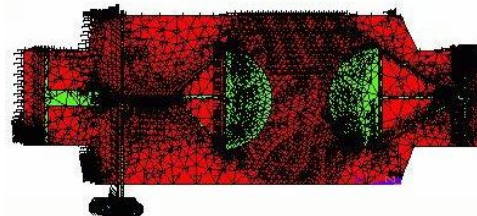


Figura 2. Selección del mallaje

La Figura 3, muestra el caso inicial en el cual, se ha seleccionado en la geometría un encapsulado de cloruro de polivinilo (PVC) de 15,24 cm de diámetro (6"), para una separación interelectródica máxima de 6,25 cm. En dicha figura se observa que se presentan mayores concentraciones de campo en las proximidades del encapsulado con los electrodos, en lugar de presentarse en la región interelectródica, produciéndose así una distribución no homogénea de la intensidad de campo eléctrico que conlleva a descargas indeseables entre los electrodos a través del encapsulado y no a través del aire.

De los resultados de la anterior simulación se observa necesario aumentar el diámetro del encapsulado a 20,32 cm (8") para obtener una distribución homogénea de la intensidad de campo eléctrico, que no se vea afectada por este.

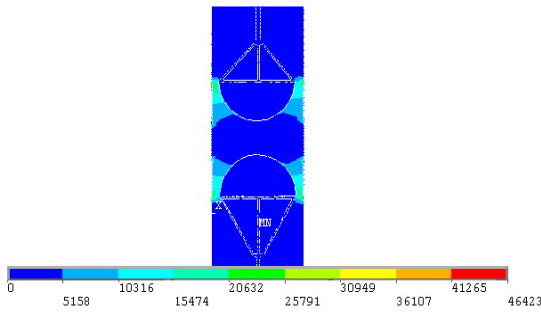


Figura 3. Ionización de la superficie del encapsulado

Una vez corregido el diámetro del encapsulado, a continuación se procede a verificar la homogeneidad del campo eléctrico presente para una separación de 1 cm y de 7 cm.

La separación de 1 cm, Figura 4, presenta un nivel de campo eléctrico muy intenso así como una alta probabilidad de disrupción entre semiesferas. Las líneas de campo observadas evidencian la homogeneidad del campo eléctrico, en la región interelectrónica.

En esta, es casi segura la aparición de una descarga ya que el campo eléctrico máximo en el espacio interelectrónico (131,84 kV/cm) supera la rigidez dieléctrica del aire presente a la altura de operación del dispositivo (24 kV/cm aprox. a 2150 m.s.n.m.)

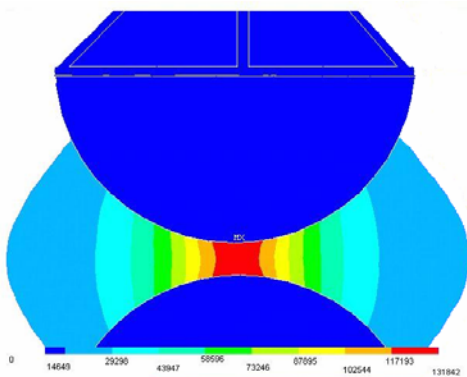


Figura 4. Campo eléctrico (V/cm) en la región interelectrónica con 1 cm de separación.

En la Figura 5, para una separación interelectrónica de 7 cm se observa una disminución tanto de la homogeneidad como de la magnitud de la intensidad de campo eléctrico, asociándose con esta última una reducción de la probabilidad de una descarga ya que el campo eléctrico máximo obtenido, de 23,24 kV/cm, es levemente inferior a la rigidez dieléctrica presente a la altura de operación del dispositivo.

Es de anotar que la separación de 7 cm entre electrodos, sobrepasa el radio de las semiesferas (6,25 cm), considerado como límite para producir descargas bajo condiciones de campo eléctrico homogéneo.

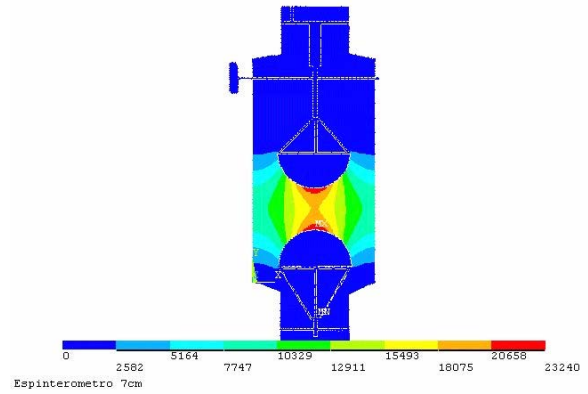


Figura 5. Campo eléctrico (V/cm) en la región interelectrónica con 7 cm de separación

La Figura 6, muestra una alta concentración de campo eléctrico en la perilla y el eje horizontal del sistema mecánico móvil (posible aparición de corona) cuando el electrodo que asocian es sometido a la tensión máxima de operación. Este efecto desaparece cuando se invierte la referencia de la tensión, aplicándose el máximo valor de esta, al electrodo opuesto, como se observa en la Figura 7.

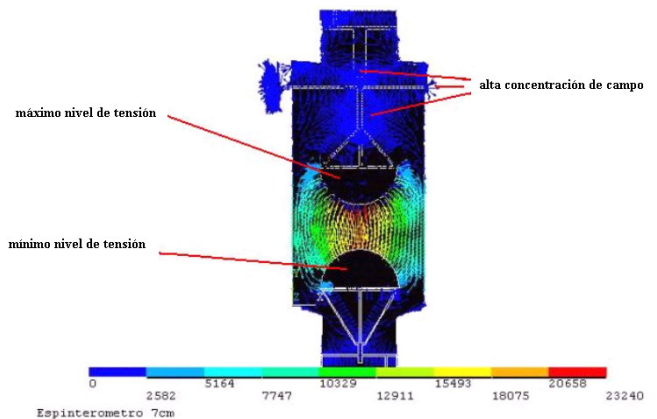


Figura 6. Líneas de campo (V/cm) en la región iterelectrónica con 7 cm de separación

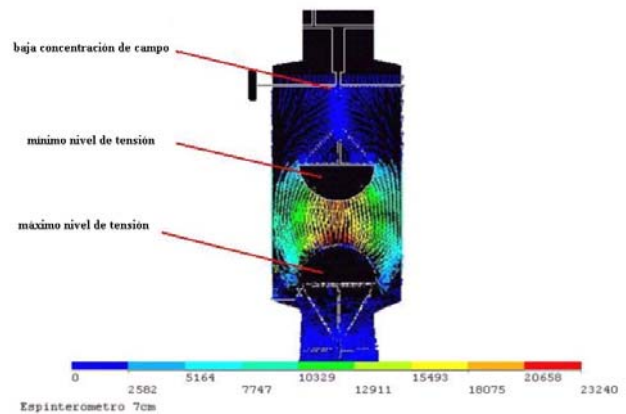


Figura 7. Líneas de campo (V/cm) en la región interelectrónica con 7 cm de separación y polaridad invertida

### 3. SELECCIÓN DE MATERIALES – CONSTRUCCION

Para las semiesferas se pueden utilizar materiales como el aluminio, el bronce o el acero, ya que estos elementos son buenos conductores. Sin embargo, el bronce y el aluminio se descartan por sus costos, seleccionándose finalmente el acero además por soportar satisfactoriamente una capa externa de cromo que prolonga la vida útil de los electrodos. Los electrodos se funden al carbono, a partir de un molde previamente hecho en madera, Figura 8.

El encapsulado, Figura 9, se construye utilizando un tubo de cloruro de polivinilo (PVC) de 20,32 cm (8”) de diámetro. En el se perforan tres ventanas para la visualización de la descarga y dos orificios laterales para los bujes donde se emplaza el eje horizontal del sistema mecánico móvil.

El encapsulado consta de reducciones en los extremos para facilitar la conexión a otros elementos del generador de impulso por medio de electrodos de conexión. Las reducciones son hechas en resina y fibra de vidrio ya que son elementos aislantes y ofrecen alta resistencia mecánica.

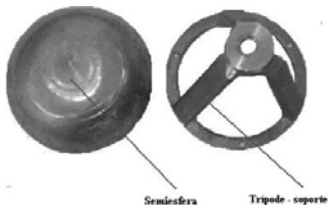


Figura 8. Electrodo y trípode porta electrodo antes del maquinado, sin cubrimiento en cromo



Figura 9. Encapsulado.

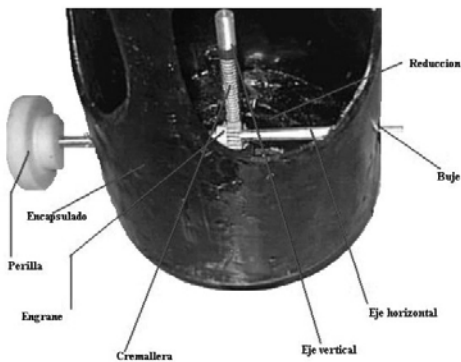


Figura 10. Sistema mecánico ensamblado

Los sistemas mecánico móvil y fijo están hechos en duraluminio por su alta resistencia al desgaste, los dos bujes que permiten el movimiento del eje horizontal fueron hechos en bronce, Figura 10.



Figura 11. Aspecto final del espinterómetro.

### 4. PRUEBAS

#### 4.1 Prueba A.C.

El montaje de esta prueba se presenta en la Figura 12, ella se efectuó a 2600 m.s.n.m. para una rigidez dieléctrica superior a 22 kV/cm con una humedad relativa del 63% y una temperatura de 18.1 ° C.

Tiene por objeto observar la tensión de disrupción a diferentes distancias interelectrónicas en el espinterómetro construido. Adicionalmente esta tensión de disrupción es comparada con la presentada en otros arreglos de electrodos, indicados en la Tabla 1.

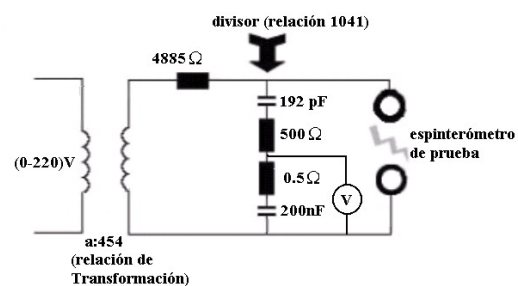


Figura 12. Circuito de la prueba en A.C.

Tipo de electrodos	Punta Placa (+)	Punta Placa (-)	Punta Punta	Esferas 10,0 cm	Semiesferas 12,5 cm
Separación					
0,74 (cm)	11,5	12,5	7,8	16,1	<b>18,7</b>
1 (cm)	16,7	18,7	10,4	23,0	<b>22,9</b>
2 (cm)	26,0	30,2	12,5	43,7	<b>45,8</b>
3 (cm)	35,8	44,8	29,2	68,7	<b>68,7</b>
4 (cm)	48,8	58,3	35,4	79,1	<b>89,5</b>
5 (cm)	50,0	66,6	41,6	87,4	<b>100,0</b>
6 (cm)	58,3	79,0	50,0	94,7	**

Tabla 1. Comparación de la tensión disruptiva (kV) en diversos arreglos de electrodos



La Tabla 2, obtenida a partir de los datos de la Tabla 1, presenta los máximos valores de campo eléctrico obtenidos de la relación de la tensión disruptiva a la distancia interelectródica. En ella se observa mayor homogeneidad del campo para los electrodos semiesféricos de 12,5 cm de diámetro.

La Figura 13, muestra el oscilograma de la tensión disruptiva del dispositivo construido, para una separación interelectródica de 2 cm, en ella se observa claramente la evidencia de las descargas, presentadas por las abruptas caídas de tensión registradas.

Tipo de electrodos Separación	Punta Placa (+)	Punta Placa (-)	Punta Punta	Esferas 10,0 cm	Semiesferas 12,5 cm
	0,74 (cm)	15,0	20,8	10,5	23,0
1 (cm)	16,7	18,7	10,4	23,0	<b>22,9</b>
2 (cm)	13,0	15,0	12,0	23,0	<b>22,9</b>
3 (cm)	11,8	14,9	9,7	22,9	<b>22,9</b>
4 (cm)	11,4	14,6	8,25	19,8	<b>22,9</b>
5 (cm)	10,0	13,3	8,32	17,8	<b>20</b>
6 (cm)	9,7	13,2	8,3	15,6	**

Tabla 2. Comparación de la máxima intensidad de campo eléctrico (kV/cm) a partir de la Tabla 1.

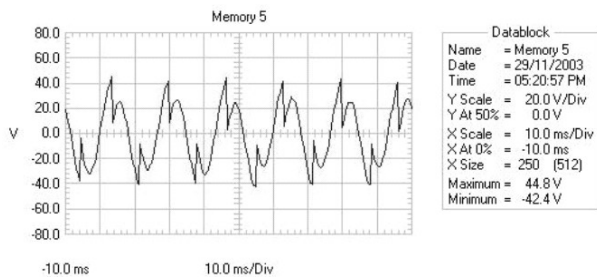


Figura 13. Tensión disruptiva A.C. para una separación de 2 cm. Eje Y: 20,82 kV/Div

La Figura 14 registra la ocurrencia de descargas en A.C.

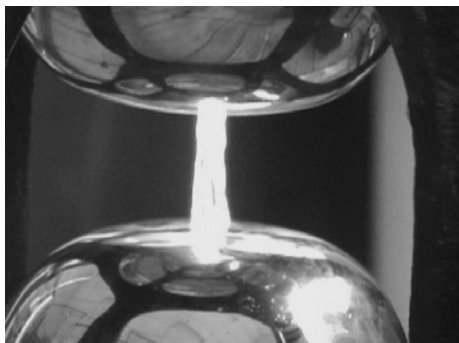


Figura 14. Descargas A.C. en la región interelectródica

### 4.2 Prueba de impulso

Tiene por objeto observar el comportamiento del espinterómetro como parte integral del generador de impulsos.

El esquema del generador de impulsos se muestra en la Figura 15.

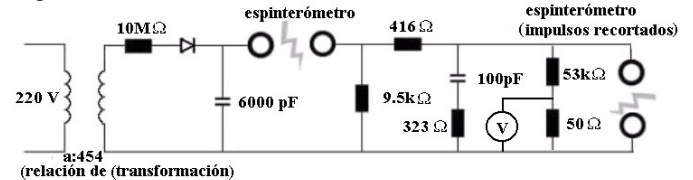


Figura 15. Circuito del generador de impulso tipo rayo.

La Figura 16, muestra un oscilograma de un impulso tipo rayo para el generador en cuestión. En este caso se utilizó el espinterómetro como interruptor, con una distancia interelectródica de 0,6 cm.

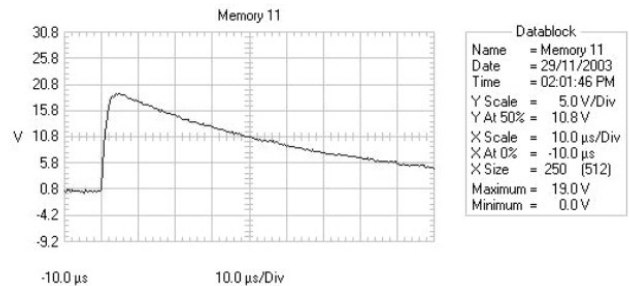


Figura 16. Impulso tipo rayo. Eje Y: 3,5 kV/Div

La Figura 17, muestra el oscilograma de un impulso recortado en la cola, obtenido cuando el espinterómetro se toma como objeto de prueba en paralelo con el divisor de tensión. En este caso la separación interelectródica fue de 4 cm.

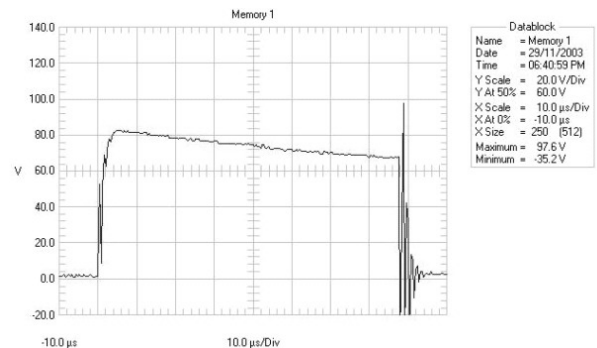


Figura 17. Impulso recortado en la cola. Eje Y: 2,7 kV/Div

## 5. CONCLUSIONES

Se construyó un espinterómetro de semiesferas de 12,5 cm de diámetro para un generador de impulsos de 140 kV. La simulación hecha en la etapa de diseño conduce a una selección de un encapsulado final de tal manera que no perturbe la aparición de la descarga en el espacio interelectródico (pérdida de homogeneidad del campo eléctrico).

Al someter el sistema mecánico móvil a la tensión máxima de operación, se hizo evidente en la simulación y se percibió de manera audible en las pruebas una alta concentración de

campo (efecto corona), tal efecto desapareció al someter dicho sistema a la tensión de referencia de operación.

En las simulaciones Figura 4, se observa la homogeneidad de campo eléctrico, dicha homogeneidad se constata de los valores obtenidos de las pruebas realizadas, Tabla 2.

Se verifica que a distancias interelectrónicas cercanas o superiores al valor del radio de las semiesferas, se pierde la homogeneidad del campo eléctrico entre estas.

## 6. AGRADECIMIENTOS

La ejecución de este trabajo ha sido posible gracias a la colaboración del personal del Laboratorio de Ensayos Eléctricos Industriales (L.A.B.E.) de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, en cabeza del Ingeniero Fernando Augusto Herrera León.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] AGUET, Michel et IANOZ, Michel. *Traité D'Électricité*. Deuxième Édition. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. 1990. v. XXII.
- [2] AREVALO, Liliana. *Estudio de la Física del Efecto Corona*. Trabajo de Grado. Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá. 2002.
- [3] BEDOYA, Duvier. *Diseño y Construcción de un Espinterómetro para un Generador de Impulso Tipo Rayo 1.2/50  $\mu$ s – 140 kV*. Trabajo de Grado. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, 2004.
- [4] BEDOYA, Duvier. ROLDAN, Francisco. *Diseño y Construcción de un Espinterómetro para un Generador de Impulso de Alta Tensión. Parte I: Fundamentos*. Scientia et Technica. U.T.P. Año X, No 26. Pereira. Diciembre 2004.
- [5] BEJARANO, Liliana. *Estudio de la Influencia de la Humedad bajo Condiciones Controladas en la Disrupción del Aire*. Trabajo de Grado. Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá. 2002.
- [6] KIND, Dieter. *High Voltage Test Techniques*. Butterworth-Heinemann Ltd. Londres, March, 1999.
- [7] KRAUSS, John D. *Electromagnetismo*. Tercera edición. McGraw Hill. México D.F. 1994.
- [8] KUFFEL, E and ZAENGL, W. S *High Voltage Engineering*. Londres: Pergamon Press. 1970.
- [9] ROMAN, Francisco. *Manual de Prácticas Docentes de Alta Tensión*. Marzo de 1988.
- [10] ROTH, Arnold. *Técnica de la Alta Tensión*. México: Labor. 1966.
- [11] SCHWAB, A. *High Voltage Measurement*, MIT press. 1972.
- [12] SIEGERT, Luis A. *Alta Tensión y Sistemas de Transmisión*, Limusa, México D.F.
- [13] ANSYS. Release 8.0. Documentation.
- [14] IEC 60-1 *General Requirements Relating to Test Procedures and Test Objects*.
- [15] IEEE std 4 – 1995. *Standard Techniques for High Voltage Testing*.

**Duvier Rolando Bedoya Bedoya**. Ingeniero Electricista, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 2004. duvier@universia.net.co – inelduvier@hotmail.com

**Francisco Abel Roldán Hoyos**. Ingeniero Electricista, U.T.P. – Pereira, 1991. *Diplôme D'Études Approfondies en Génie Électrique*, INPG-Francia, 1996. Profesor Asistente Universidad Nacional de Colombia. Depto. de Ing. Eléctrica Electrónica y Computación. Manizales – Colombia. froldan@nevado.manizales.unal.edu.co

**Fernando Augusto Herrera León**. Ingeniero Electricista, M.Sc. en Ingeniería Eléctrica, Universidad Nacional de Colombia – Profesor Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad Nacional de Colombia – Bogotá. herrerafer@unal.edu.co fernando.herrera@gelvez.com