



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Diseño y construcción de un explosor de esferas para aplicaciones en alta tensión**

**PAOLA ANDREA MARTÍNEZ SERNA**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación  
Manizales, Colombia

2021



# **Diseño y construcción de un explosor de esferas para aplicaciones en alta tensión**

**PAOLA ANDREA MARTÍNEZ SERNA**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Magíster en Ingeniería, Ingeniería Eléctrica**

Director:

**FRANCISCO ABEL ROLDÁN HOYOS**

DEA Génie Électrique - I.E

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación

Manizales, Colombia

2021

## **Agradecimientos**

Agradezco a Dios por su inmensa generosidad

Al ingeniero Francisco Abel Roldán Hoyos por su paciencia, comprensión y apoyo incondicional, por cada palabra de ánimo durante la realización de este trabajo.

A la ingeniera María Fanny Ocampo Barrero, coordinadora de laboratorio de procesos productivos y al técnico operativo César Augusto Sánchez Ramírez, adscritos al Laboratorio de Procesos Productivos de la Universidad Nacional – Sede Manizales – por su valioso aporte en la construcción del prototipo del Explosor de Esferas objeto de este trabajo.



## Resumen

### Diseño y construcción de un explosor de esferas para aplicaciones en alta tensión

El presente trabajo explora dos alternativas para la materialización de un explosor de esferas acoplable a un kit de alta tensión para impulsos tipo rayo compatible con Messwandler – Bau (MWB) / TERCO.

El explosor desarrollado satisface la complementariedad, modularidad y portabilidad de los elementos del kit de pruebas disponible, permitiendo ampliar el rango de tensiones de impulso tipo rayo hasta los 400 kV aproximadamente.

Como alternativas se consideraron, una réplica del explosor comercial existente y un prototipo multietapa propio de bajo costo, contemplando en este último, componentes, materiales, dimensionamiento y ensamble, cumpliendo con características técnicas, acordes con los estándares IEEE Std 4 - 2013 e IEC 60052 – 2002. Para la réplica se consolidaron los planos detallados del explosor disponible.

Dada la no disponibilidad de algunos elementos y componentes, además, de la del campo de pruebas, no ha sido posible validar el desempeño del prototipo en el generador de impulsos.

**Palabras clave:** campo eléctrico, descarga disruptiva, ensayos en alta tensión, explosor de esferas, tensión de rotura.



## Abstract

### Design and construction of a sphere gap for high voltage applications

The present work explores two alternatives for the realization of a sphere gap that can be adapted to a compatible high voltage kit for lightning impulses: Messwandler-Bau (MWB) / TERCO.

The developed spark gap satisfies the complementarity, modularity, and portability of the elements from the available test kit, allowing the range of lightning impulse voltages to be extended up to 400 kV approx.

As alternatives, were considered a replica of the existing commercial spark gap and a low-cost multistage prototype, considering in the latter, components, materials, sizing and assembly, complying with technical characteristics, dimensions and materials required under standards IEEE Std 4-2013 and IEC 60052 - 2002. For the replica, the detailed drawings of the available spark gap were consolidated for convenience.

Given the unavailability of some elements and components, in addition to that of the test field, it has not been possible to validate the performance of the prototype in the impulse generator.

**Keywords:** breakdown voltage, disruptive discharge, electric field, high voltage testing, sphere gap.





# Contenido

	Pág.
Resumen .....	VII
Abstract.....	IX
Lista de figuras.....	XIII
Lista de tablas .....	XV
Glosario.....	1
Introducción .....	5
<b>1. Campo eléctrico, explosores en aire atmosférico y configuraciones geométricas típicas de electrodos: generalidades.....</b>	<b>11</b>
1.1 Clasificación de campos eléctricos [2].....	11
1.2 Grado de uniformidad de campos eléctricos / Factor de utilización / Factor de Schwaiger, $\eta$ [2].....	12
1.3 Explosores en aire atmosférico .....	15
1.4 Configuraciones geométricas no simétricas .....	17
1.4.1 Electrodo varilla – placa (campo extremadamente no uniforme) .....	17
1.5 Configuraciones geométricas simétricas .....	17
1.5.1 Electrodo placa – placa (campo uniforme) .....	17
1.5.2 Electrodo varilla – varilla (campo extremadamente no uniforme) .....	19
1.5.3 Electrodo esfera – esfera (campo débilmente no uniforme) .....	20
<b>2. Dimensionamiento de explosores de esferas para medida .....</b>	<b>25</b>
2.1 Requerimientos generales.....	25
2.2 Forma y condiciones de la superficie de las esferas.....	26
2.3 Disposición física del explosor.....	26
2.4 Espacios libres alrededor de las esferas .....	27
2.5 Conexiones .....	28
2.6 Tensión de descarga disruptiva.....	28
2.7 Consideraciones adicionales para la implementación .....	30

<b>3. Construcción del prototipo .....</b>	<b>33</b>
3.1 Alternativa 1. Réplica del explosor comercial .....	33
3.2 Alternativa 2. Explosor modular multietapa .....	35
3.3 Electrodo.....	36
3.4 Vástagos y fleje de conexión eléctrica .....	37
3.5 Estructura y dimensiones del prototipo .....	39
3.6 Costos del proyecto .....	42
<b>4. Resultados, discusiones, conclusiones, recomendaciones y perspectivas .....</b>	<b>43</b>
4.1 Resultados, discusiones y conclusiones .....	43
4.2 Recomendaciones y perspectivas.....	44
<b>ANEXO A - Esfuerzo eléctrico en un dieléctrico entre dos electrodos idénticos enfrentados en tres configuraciones diferentes [2] .....</b>	<b>45</b>
<b>ANEXO B – Valores pico de tensión de rotura para algunos explosores de esfera normalizado [5] .....</b>	<b>46</b>
<b>ANEXO C - Vistas réplica explosor .....</b>	<b>48</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>51</b>

## Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Clasificación de campos eléctricos.....	11
Figura 1-2: Esfuerzo eléctrico en un dieléctrico entre dos electrodos idénticos .....	13
Figura 1-3: Curvas de Schwaiger para campos con configuraciones de electrodos esféricos, cilíndricos y curvos .....	14
Figura 1-4: a) Configuración varilla – plano, b) Distribución de campo eléctrico electrodos varilla – plano .....	17
Figura 1-5: a) Configuración placa – placa con perfil de Rogowski. b) Distribución de campo eléctrico electrodos placa – placa .....	18
Figura 1-6: Característica de la tensión de rotura en campo uniformes en aire atmosférico .....	19
Figura 1-7: a) Configuración varilla – varilla b) Distribución de campo eléctrico no uniforme. ....	20
Figura 1-8: a) Configuración esfera – esfera. b) Distribución de campo eléctrico electrodos esfera – esfera. ....	21
Figura 1-9: Variación en la tensión de rotura en AC en aire atmosférico en condiciones normalizadas.....	22
Figura 2-1: Disposición física de los explosores de esferas. a) Horizontal, b) Vertical ....	27
Figura 2-2: Explosores de esfera en un generador de impulsos .....	31
Figura 3-1: Explosor de esferas comercial.....	34
Figura 3-2: Explosor de esferas - corte axial longitudinal.....	34
Figura 3-3: Explosor de esferas sin encapsulado .....	35
Figura 3-4: Explosor de esferas - perspectiva general.....	35
Figura 3-5: Esfera en acero cromado con diámetro aproximado de 10 cm. ....	36
Figura 3-6: Esferómetro.....	36
Figura 3-7: Vástago de soporte y tornillo de sujeción .....	37
Figura 3-8: Fleje de bronce, tornillo de sujeción, vástago y esfera .....	37
Figura 3-9: Ensemble completo de fleje de bronce, tornillo de sujeción, vástago y esfera .....	37
Figura 3-10: Tornillo mariposa de sujeción rosca 6 mm.....	38
Figura 3-11: Fleje de bronce.....	38
Figura 3-12: Vástago .....	38

Figura 3-13: Esquema general del prototipo ensamble de 4 etapas. a) vista frontal, b) vista lateral.....	39
Figura 3-14. Tensión de rotura de explosor de esferas en función de su separación .....	40
Figura 3-15: Ensamble del prototipo a) 1 etapa, b) 2 etapas .....	41
Figura 3-16: Imagen del prototipo armado con 3 etapas .....	41

## Lista de tablas

**Pág.**

Tabla 2-1: Espacios libres alrededor de las esferas. ....	28
Tabla 2-2: Valores pico de tensión de rotura para algunos explosores de esfera normalizado.....	29



## Glosario

**Aislante:** (revestimiento de un conductor, protectores, varillas y otros dispositivos de seguridad) dispositivo que, al interponerse entre una persona y las partes portadoras de corriente, protege a la persona que lo utiliza contra descargas eléctricas de la corriente [1].

**Campo eléctrico:** ver Intensidad de campo eléctrico. Un campo vectorial de intensidad de campo eléctrico o de densidad de flujo (desplazamiento,  $D$ ) eléctrico. Nota: El término también se usa para denotar una región en la que dichos campos vectoriales tienen una magnitud significativa [1]. La razón de la fuerza ejercida sobre una carga de prueba positiva, colocada en ese punto, a la magnitud de la carga [2].

**Carga eléctrica:** la presencia de un exceso no cancelado de partículas subatómicas positivas (protones) o partículas subatómicas negativas (electrones) en una sustancia [2].

**Chispazo (sparkover):** descarga disruptiva que ocurre en un dieléctrico gaseoso o líquido [1].

**Corona:** un resplandor tenue adyacente a la superficie de un conductor eléctrico a alto voltaje. El fenómeno estable de rotura parcial (partial breakdown - PB) en dieléctricos/medios gaseosos se conoce como corona [2].

**Corriente de rotura de aislamiento:** corriente suministrada por el aparato de prueba cuando se produce una rotura dieléctrica [1].

**Descarga disruptiva:** falla del aislamiento bajo esfuerzo eléctrico en la cual la descarga puentea completamente el aislamiento bajo prueba reduciendo la tensión entre electrodos a prácticamente cero [3].



**Dieléctrico:** ver aislante. Medio en el que es posible mantener un campo eléctrico con poco suministro de energía de fuentes externas [1]. Un material no conductor o aislante; un material que admite líneas de fuerza electrostáticas y magnéticas, pero resiste el paso de la corriente eléctrica. Sin embargo, no hay dieléctrico que no tenga alguna conducción de carga o corriente. Las corrientes de conducción a través de los dieléctricos dependen principalmente de su valor de permitividad relativa  $\epsilon_r$  y del tipo y amplitud del voltaje aplicado [2].

**Explosor (spark-gap):** dispositivo con dos o más electrodos diseñado para que se produzcan chispas en condiciones específicas y predecibles [4].

**Fallo completo:** ver rotura completa [2].

**Fallo parcial / descarga parcial (partial breakdown - PB / partial discharge - PD):** ver rotura parcial [2].

**Flameo (flashover):** Descarga disruptiva que ocurre sobre la superficie de un dieléctrico en un dieléctrico gaseoso o líquido [1].

**Fortaleza eléctrica (electric strength):** ver rigidez dieléctrica [5].

**Intensidad de campo eléctrico / fortaleza de campo eléctrico / esfuerzo de campo eléctrico, E (electric field intensity / electric field strength / electrical field stress, E):** magnitud de la fuerza vectorial ejercida sobre una carga puntual de magnitud unitaria y polaridad positiva (un culombio positivo) [4]. Se refiere a la intensidad, fortaleza o esfuerzo (ejercido por) de un campo eléctrico. Numéricamente es igual al gradiente del potencial eléctrico [2], [5].

**Ion:** un átomo electrificado que tiene una carga positiva o negativa. Un átomo electrificado que ha aumentado o disminuido su número de electrones después de la electrólisis (ionización). Un átomo o molécula con una carga eléctrica neta producida a través de la pérdida o ganancia de electrones [2].

**Ionizar:** convertir un átomo, molécula o sustancia, en un ion o iones [2].

**Ionización:** el proceso de formación de iones [2].

**Material aislante:** material en el que un voltaje aplicado entre dos puntos sobre o dentro del material produce una corriente pequeña y, a veces, insignificante [1].

**Punto de chispa:** esta región está definida por un círculo como el que se dibujaría en las esferas mediante un par de divisiones colocadas en una apertura de  $0,3 D$  y centrados en el punto de chispa [7].

**Rigidez o fortaleza di/eléctricas,  $E_b$  o  $E_d$  (breakdown strength / dielectric strength / electrical strength):** es el esfuerzo eléctrico máximo (intensidad de campo eléctrico máximo) que un material dieléctrico puede soportar previo a la rotura completa [2] [5]. La rigidez dieléctrica depende en mayor o menor medida de varios parámetros que influyen como el radio de curvatura y el acabado superficial de los electrodos, el espesor de la capa de aislamiento, el tipo de tensión, la duración de la tensión, la presión, la temperatura, la frecuencia y la humedad [8].

**Rotura completa:** La rotura o falla completa del aislamiento eléctrico entre dos electrodos se describe como "rotura". Generalmente se denomina "falla eléctrica", o simplemente "falla" [2].

**Rotura parcial (partial breakdown - PB):** El fenómeno de falla de las propiedades aislantes confinado localmente a una parte del sistema de aislamiento total proporcionado entre dos electrodos se conoce como rotura local. Dado que se produce de forma parcial, no global, se describe como rotura parcial (partial breakdown – PB) en un aislamiento eléctrico. La parte sana del dieléctrico continúa proporcionando aislamiento eléctrico entre los dos electrodos a pesar del fallo de las propiedades aislantes en alguna parte limitada. La terminología, muy utilizada hasta ahora, para describir este fenómeno en la literatura ha sido descarga parcial - PD. Dado que la palabra descarga tiene varios significados, es más apropiado describir este fenómeno como rotura o falla parcial – PB [2].

**Serpentina (streamer):** El fenómeno de rotura parcial - PB en dieléctricos gaseosos entre varillas semiesféricas, electrodos esféricos o similares que parece ondular como una serpiente o una lluvia de descarga, se conoce como serpiente corona [2].

**Tensión de ensayo:** tensión de prueba (pruebas de aislamiento eléctrico), la tensión aplicada a través de la muestra durante una prueba [1].

**Tensión de inicio (cebado) de rotura parcial,  $U_i$ :** voltaje aplicado a través del dieléctrico, en el que la rotura (o descarga) parcial comienza localmente en algún lugar del dieléctrico [2].

**Tensión de rotura (total o global),  $U_b$ :** voltaje aplicado en el que la rotura o descarga puentea por completo los electrodos que confinan un dieléctrico. La descarga así producida puede ser superficial; o al interior del dieléctrico, en el caso de dieléctricos líquidos o sólidos. La tensión de rotura depende en mayor o menor medida de varios parámetros que influyen como el radio de curvatura y el acabado superficial de los electrodos, el espesor de la capa de aislamiento, el tipo de tensión, la duración de la tensión, la presión, la temperatura, la frecuencia y la humedad [8].

**$V_{50\%}$ :** 50 % de tensión de descarga disruptiva de un objeto de prueba - valor prospectivo de la tensión que tiene un 50% de probabilidad de producir una descarga disruptiva en un objeto de prueba [3].

## Introducción

La introducción de ensayos a equipos en alta tensión se da en la primera década del siglo XX [7], estos inicialmente se formularon en corriente alterna a frecuencia industrial (50 Hz o 60 Hz), con el uso de transformadores de prueba, que luego fueron adaptados a transformadores en cascada; para ese entonces estas pruebas suponían todas las exposiciones a altas tensiones a que estaban sometidos los equipos eléctricos de un sistema; también se efectuaron pruebas en DC, basados en circuitos multiplicadores.

Más adelante con la observación y el estudio del deterioro de equipos por cuenta de las descargas atmosféricas, hacía la década de 1930, se implementaron las pruebas para impulso de rayo (Lightning Impulse, LI) [7], con base en los circuitos desarrollados para este fin en la década precedente.

En los años 60s, el análisis de las operaciones de conmutación dio paso a la inclusión de las pruebas de impulso de conmutación (Switching Impulse, SI), cuyas tensiones de prueba se pueden obtener con los generadores de impulso de rayo o por transformadores de prueba [7]. Unos 30 años después, se analizaron las perturbaciones de naturaleza ultrarrápida presentes en los equipos de las subestaciones con aislamiento de gas SF<sub>6</sub>, desarrollándose pruebas con tensiones combinadas para este fin.

Para cada uno de estos ensayos se plantearon esquemas específicos con equipos dedicados, que permiten la generación de altas tensiones los que han sido empleados hasta el presente en laboratorios de ensayos de carácter especializado y para muy alta tensión.

Equipos de prueba multipropósito para uso académico a niveles moderados de la alta tensión; fueron usados con antelación, pero reportados desde el año 1960, como kits de

pruebas modulares [9], siendo una solución práctica y económica para instituciones académicas y de investigación, que permiten observar igualmente la mayoría de los fenómenos presentes a niveles mayores de tensión, con una inversión inferior en infraestructura, equipos, operación y mantenimiento [10].

En Colombia, la Universidad Nacional de Colombia – sede Bogotá, en las décadas de los 60s y 70s, adquiere los primeros equipos multipropósito con elementos modulares para la instrucción en alta tensión. Con el paso de los años diferentes instituciones educativas se han sumado a este tipo de soluciones, entre las que se encuentran: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Universidad Nacional de Colombia – sede Manizales, Universidad de Santander.

Las dimensiones de los espacios de ensayo y los equipos empleados en instituciones académicas están determinadas principalmente por la magnitud de la tensión a generar y la aplicación prevista, ya sea con fines de instrucción, como laboratorio de pruebas o de investigación [9].

Para efectos prácticos y con base en las aplicaciones de alta tensión que pueden desarrollarse en las universidades, los sistemas de prueba multipropósito están enfocados a trabajos de investigación, desarrollo, capacitación técnica [10], calibración de sistemas de medición, pruebas de aislamientos y en algunas ocasiones para realizar pruebas a clientes externos [11], considerándose elementos versátiles para este conjunto de aplicaciones.

Una característica de resaltar de los equipos modulares multipropósito, usados en laboratorios de pruebas de alta tensión de carácter académico, es su versatilidad dada la facilidad de ensamble y portabilidad, permitiendo efectuar configuraciones variadas (AC, DC e impulso), mediante el intercambio de componentes, incorporando secuencialmente elementos que puedan generar mayores niveles de tensión o ajustando las características de las señales de prueba.

De otra parte, una limitante de los equipos modulares multipropósito, está asociada con la disponibilidad de niveles de tensión y potencia, no superiores a algunas centenas de kV y

---

kVA respectivamente, correspondientes al rango de pruebas de equipos de media y alta tensión entre 36 kV y 123 kV como tensiones máximas de aislamiento [12].

El área de ensayos en Alta Tensión del Laboratorio de Electricidad y Electrónica de la Universidad Nacional - sede Manizales, cuenta con algunos componentes de un equipo comercial multipropósito modular, que puede configurarse para generar altas tensiones en AC, DC e impulso, actualmente hasta una tensión de 140 kV pico.

Concebido desde el año 2001, su ensamble se inició en el año 2004, con el desarrollo de elementos modulares mediante proyectos académicos, entre los que se pueden citar: elementos de conexión, sujeción, soportes aislantes, capacitores, resistores, divisores, explosor de esferas, entre otros, desarrollados de manera artesanal, con base en catálogos de fabricantes de este tipo de equipos.

Algunos de estos, han funcionado de manera satisfactoria, en un proceso evolutivo de aprendizaje. Posteriormente, fueron adquiridos elementos comerciales compatibles, que sustituyeron aquellas piezas desarrolladas localmente que no se desempeñaron adecuadamente.

El primer elemento desarrollado con un desempeño aceptable fue el explosor de esferas [13], en cuya concepción se empleó un programa de simulación de elementos finitos, pasando por su construcción y pruebas de validación. Este dispositivo fue concebido como una unidad autónoma y no posibilita su funcionamiento en cascada acoplado con otros explosores; tal como lo hacen explosores comerciales en esquemas multietapa de generación de impulsos.

Una explicación compacta pero detallada del funcionamiento básico, de las características de los componentes del circuito, la descripción de la onda normalizada de impulso (rayo/maniobra), las restricciones de los generadores de una etapa, las ventajas de los generadores multietapa y de los factores que influyen el desempeño de los circuitos de generadores de impulso multietapa, se discuten en la referencia [14].

Tales esquemas de cascada (multietapa) fueron propuestos por Erwin Otto Marx, en el año 1923 [15] y permiten incrementar las tensiones de impulso, al utilizar múltiples etapas, en las que también intervienen los explosores de esferas.

Existen múltiples reportes en la construcción, caracterización, aplicación y pruebas de los explosores de esferas, en los que se establecen las condiciones particulares para su utilización como instrumentos de medida (actualmente en desuso), o bien como dispositivos de conmutación activados por tensión; algunos de estos ejemplos se pueden citar [16], [17], [18].

Con la posibilidad de agregar un nuevo explosor, se podría ampliar el rango de tensiones de prueba. Para este fin se propone el diseño, dimensionamiento y construcción de un explosor de esferas compatible con el equipo modular y comercial existente, a través de dos posibles alternativas de desarrollo. La primera consistente en una réplica del explosor comercial y la segunda en desarrollar un explosor modular multietapa. Ambas alternativas deberán posibilitar técnicamente su acople con los componentes modulares existentes.

El proyecto se desarrolló en 4 capítulos, en el primero de ellos, se describen algunas generalidades de los campos eléctricos y su relación con explosores en diferentes configuraciones geométricas simétricas y no simétricas; su funcionamiento, usos y aplicaciones. El capítulo 2, contiene las consideraciones generales para el dimensionamiento de los explosores de esferas usados para medida, con base en las normas IEC e IEEE; que igualmente, son aplicables a los explosores usados como interruptores activados por tensión, como es el caso del prototipo desarrollado en este trabajo.

En el tercer capítulo, se plantean y describen las dos alternativas propuestas para el desarrollo del prototipo, una de ellas consistente en la réplica del explosor comercial existente en el área de ensayos en Alta Tensión del Laboratorio de Electricidad y Electrónica, para la cual, se obtuvieron los planos detallados para su futura materialización.

En la segunda alternativa, se materializó un prototipo modular acoplable con el equipo multipropósito disponible. Para su ensamble se usaron materiales comerciales, que se ajustan a las recomendaciones dadas en las normas.

Por último, en el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos con el desarrollo de este trabajo, las consideraciones y requerimientos para su puesta en operación y se plantean alternativas para futuros trabajos complementarios, que permitirán ampliar el rango de tensión de pruebas en el laboratorio.



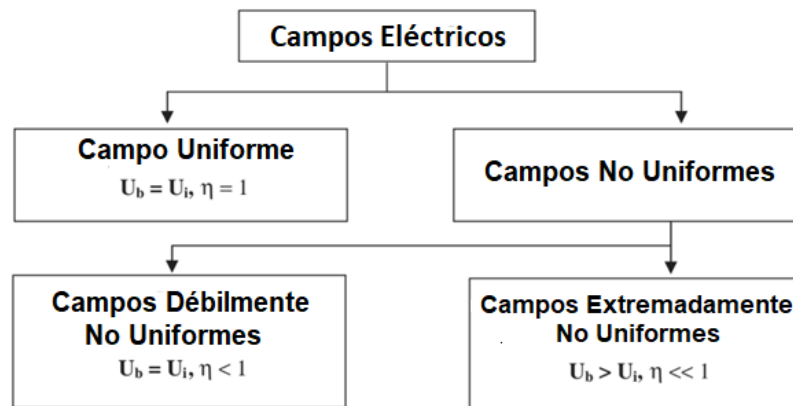


# 1. Campo eléctrico, explosores en aire atmosférico y configuraciones geométricas típicas de electrodos: generalidades

## 1.1 Clasificación de campos eléctricos [2]

En un campo uniforme, el potencial está linealmente distribuido a lo largo del dieléctrico y las líneas de campo y las equipotenciales, forman cuadrados perfectos en la región principal del campo, por lo tanto, la intensidad del campo eléctrico es constante en todo el espacio entre los dos electrodos.

Figura 1-1: Clasificación de campos eléctricos



Tomado de R. Arora and W. Mosh [2]

La figura 1-1 muestra la clasificación de los campos eléctricos descritos en el presente apartado.

En un campo uniforme la rotura o falla completa del aislamiento siempre tiene lugar sin que se produzca una rotura parcial dentro del dieléctrico. Es decir, en una configuración

de campo uniforme, la tensión de rotura,  $U_b$ , es igual a la tensión de inicio de rotura parcial,  $U_i$ , ( $U_i = U_b$ ). Este comportamiento también se observa en los campos débilmente no uniformes ( $U_i \approx U_b$ ).

En un campo cuya intensidad de campo eléctrico es extremadamente no uniforme, su distribución de potencial es extremadamente no lineal. La rotura del dieléctrico siempre se produce posteriormente al establecimiento de un fenómeno de rotura parcial estable PB (PD), donde ( $U_i \ll U_b$ ). Esta condición es de interés, dado que representa la condición más desfavorable de campo eléctrico que experimenta un dieléctrico.

El comportamiento de los dieléctricos depende en gran medida del tipo de campo al que están sujetos. No se produce ninguna descarga parcial PB (PD) estable, en condiciones de campo uniforme, ni débilmente no uniforme. La transición de campo débil a extremadamente no uniforme en un dieléctrico va acompañada de descarga parcial PB (PD), o inicio de corona.

## 1.2 Grado de uniformidad de campos eléctricos / Factor de utilización / Factor de Schwaiger, $\eta$ [2]

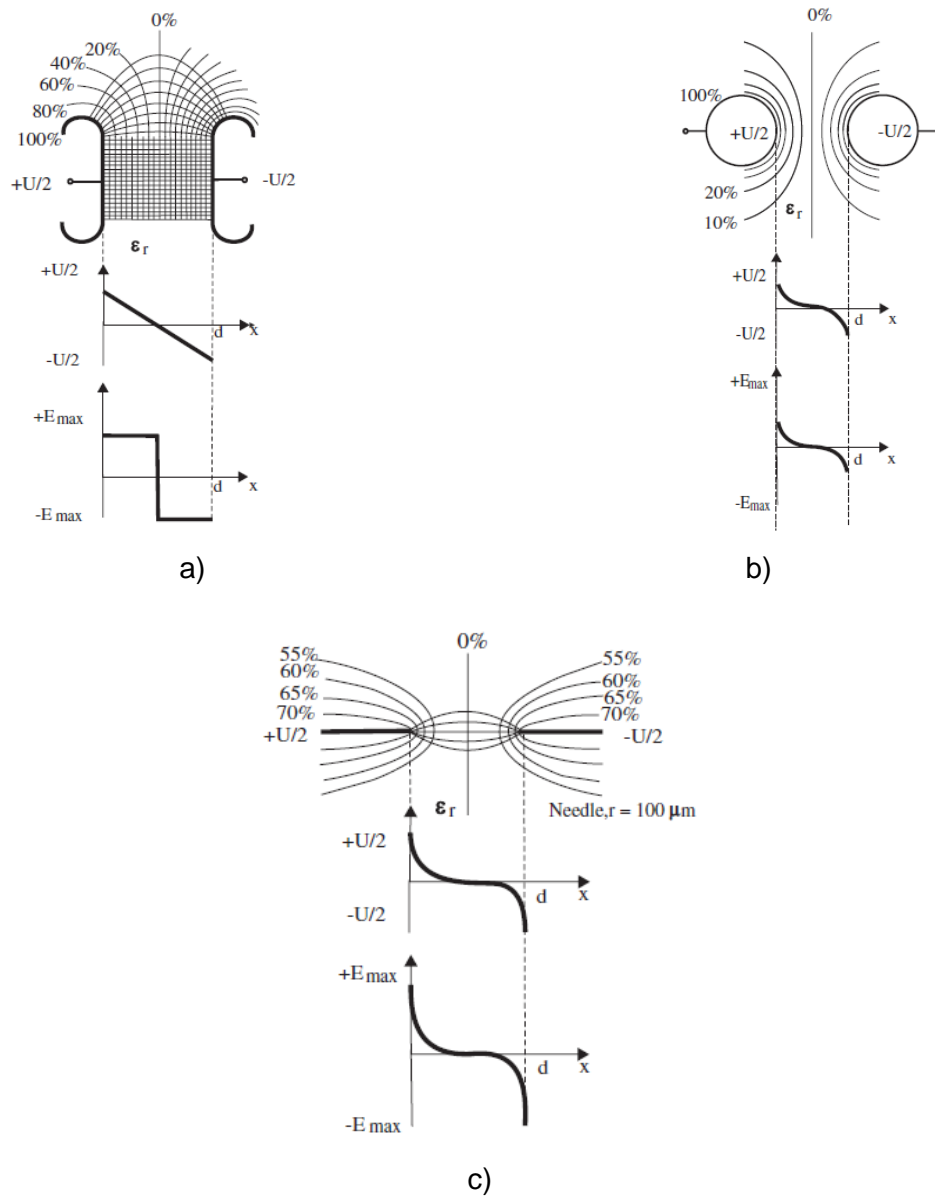
Se define como la razón (comparación) de las intensidades pico de campo eléctrico medio ( $\hat{E}_{mean}$ ), que representa la condición de campo más favorable (campo homogéneo), a una condición de campo más desfavorable, correspondiente al campo máximo real existente ( $\hat{E}_{max}$ ) en un dieléctrico. Por su parte el campo  $\hat{E}_{mean}$  corresponde a la razón entre la tensión cresta entre electrodos ( $\hat{U}$ ) y la menor distancia ( $d$ ) entre los mismos. Teniéndose que:

$$\hat{U} = \hat{E}_{max} * \eta * d$$

Un condensador ideal con electrodos de placas circulares paralelas, separadas levemente en comparación con el radio de las placas, sería la configuración que mejor describiría la condición física de un campo uniforme ( $\eta = 1$ ); a su vez, el campo entre dos esferas adyacentes con sus electrodos separados levemente es representativo de campos débilmente no uniformes. Su grado de uniformidad,  $\eta$  es menor que uno y su valor límite inferior depende de las condiciones físicas del dieléctrico entre los electrodos. Por su parte,

dos electrodos punta - punta axialmente enfrentados, son representativos de una configuración de campo eléctrico extremadamente no uniforme y en ellos se registran los más bajos factores de utilización [2]. La figura 1-2 muestra las configuraciones de campo (a) campo uniforme entre dos placas paralelas, (b) campo débilmente no uniforme entre dos esferas adyacentes y (c) campo extremadamente no uniforme entre electrodos punta - punta. Ver Anexo A.

Figura 1-2: Esfuerzo eléctrico en un dieléctrico entre dos electrodos idénticos

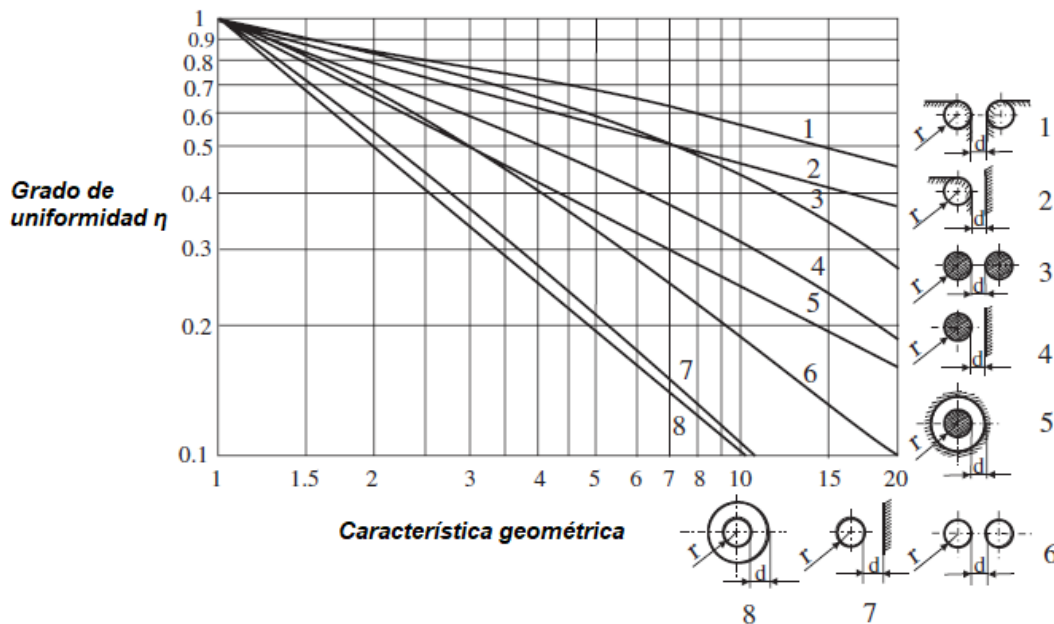


Tomado de R. Arora and W. Mosh [2]

El valor de  $\eta$ , cantidad adimensional definida entre uno y cero, también representa el grado de uso del dieléctrico entre dos electrodos. Un valor más alto de  $\eta$  representa un mejor uso de las propiedades aislantes del dieléctrico. Así pues, el conocimiento de  $\eta$ , para una configuración particular de campo, sirve como una referencia rápida que da información importante para el diseño de aislamiento, pudiéndose estimar fácilmente la intensidad máxima del campo eléctrico (rigidez dieléctrica), o la tensión eléctrica máxima en un dieléctrico. El recíproco de  $\eta$  se denota por  $f$ , que representa el grado de no uniformidad de un campo eléctrico.

Schwaiger también introdujo las llamadas “Curvas de Schwaiger”, que relacionan el grado de uniformidad  $\eta$  en función de un factor geométrico característico  $p$  para una configuración de electrodos dada. El factor  $p$ , que toma valores  $[1 \leq p < \infty)$ , a su vez depende del menor radio de curvatura de los electrodos ( $r$ ), y de la distancia de separación más corta entre los dos electrodos en consideración ( $d$ ); y se define como la suma de  $r$  y  $d$ , dividida entre  $r$ . En la 1-3, las curvas 1 y 2 representan electrodos de superficie curva; 3, 4 y 5 son para electrodos cilíndricos; y 6, 7 y 8 para sistemas de electrodos esféricos [2].

Figura 1-3: Curvas de Schwaiger para campos con configuraciones de electrodos esféricos, cilíndricos y curvos



Tomado de R. Arora and W. Mosh [2]

Para un valor fijo de  $p$ , a partir de estas curvas se observa la siguiente relación básica importante entre diferentes sistemas de electrodos dependiendo del valor de  $\eta$ :

- a) Campos entre sistemas de electrodos cilíndricos; cilindros paralelos (cilindro - cilindro) (3), cilindro - plano (4), cilindros concéntricos (5), etc., tienen un valor mayor de  $\eta$ , es decir, son más uniformes que los campos en sistemas de electrodos esféricos; esfera - esfera (6), esfera - plano (7), esferas concéntricas (8), etc.
- b) Un *sistema de electrodos simétrico*, por ejemplo, esfera - esfera o cilindro paralelos (cilindro - cilindro), tiene un valor mayor de  $\eta$  que el sistema asimétrico correspondiente, es decir, sistemas esfera - plano o cilindro - plano.
- c) El campo entre dos electrodos, cilindros o esferas similares, colocados uno al lado del otro, es más uniforme o tiene un valor de  $\eta$  mayor que cuando los electrodos están colocados en formación coaxial o concéntrica [2].

De las observaciones b) y c), se desprenden las bondades de las configuraciones de cilindros paralelos y de esfera - esfera, contando esta última con la ventaja espacial (volumétrica) de un único radio de curvatura, lo que beneficia la homogeneidad del campo.

### 1.3 Explosores en aire atmosférico

“El aire es el medio aislante comúnmente más usado en equipo eléctrico. Durante más de un siglo los fenómenos de descarga en aire han sido extensamente investigados, tanto experimentalmente como teóricamente. El problema que debe ser resuelto para el aislamiento en aire es como determinar la tensión de rotura de varias geometrías de espacios de aire entre electrodos (air gaps), bajo diferentes tipos de tensiones aplicadas, las cuales contribuyen a seleccionar la estructura de electrodos y su separación apropiada, de forma que, guíe el diseño del aislamiento de equipo eléctrico. Hasta ahora, la teoría de descarga en aire no es aún perfecta y en consecuencia es difícil de determinar la tensión de rotura exacta por cálculos teóricos. El diseño de ingeniería aún confía en los datos medidos y en las leyes empíricas, obtenidas por ensayos de descarga.

Para un espacio de aire bajo una tensión aplicada dada, el proceso de descarga varía cada vez bajo las mismas condiciones de prueba, pero la dispersión de la tensión de rotura permanece dentro de un cierto rango. Por tanto, bajo una tensión aplicada y condición

atmosférica específica, la tensión de rotura del espacio de aire está determinada por la estructura de los electrodos, la cual puede ser caracterizada por la distribución del campo eléctrico estático.

Bajo tensiones de impulso de conmutación y rayo, la rigidez dieléctrica del aire también está relacionada con la forma de onda de la tensión. La distribución de campo eléctrico y la forma de onda aplicada determinan respectivamente las características de distribución espacial y temporal del estado de la energía almacenada” [19].

Los explosores en diversas configuraciones de electrodos son usados típicamente en circuitos de prueba en alta tensión [9], como dispositivos de conmutación dependientes de tensión; pudiéndose utilizar en la protección contra sobretensiones, conmutación en circuitos de tensión de impulso, verificación de medición y verificación de calibración de equipos [9], [20].

La separación de estos electrodos generalmente está dada por un medio gaseoso no conductor, pudiendo ser aire atmosférico como la opción más utilizada, de modo que se asegure la repetibilidad del proceso de conmutación; sin embargo, es necesario considerar que los parámetros atmosféricos inciden en la descarga, de allí que, sea necesario realizar las correcciones cuando estas condiciones varíen [19].

La descarga entre electrodos resulta de la ionización del aire (para el caso de explosores separados por este medio), bajo el efecto del campo eléctrico, cuando este excede un cierto límite que conlleva a que el dieléctrico pierda su capacidad de aislamiento.

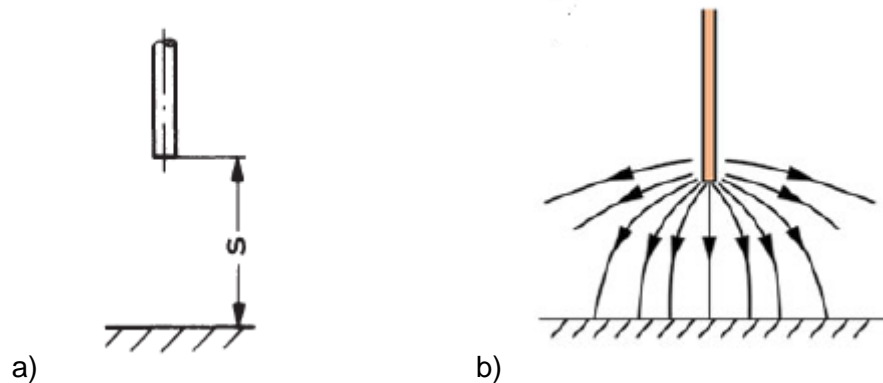
Dentro de las disposiciones típicas de explosores se tienen configuraciones geométricas de simetría axial (placa – placa, varilla – varilla o esfera – esfera) y también configuraciones geométricas no simétricas (varilla – placa, etc.); bajo estas condiciones, la distribución de campo eléctrico juega un papel determinante en su aplicación.

## 1.4 Configuraciones geométricas no simétricas

### 1.4.1 Electrodo varilla – placa (campo extremadamente no uniforme)

La configuración varilla - placa es una disposición no simétrica; donde el campo eléctrico entre electrodos es menos homogéneo que en otras disposiciones de explosores. El grado de no homogeneidad se relaciona con las dimensiones de la varilla y la placa, así como, la longitud del espacio entre estas [15]. Esta configuración de electrodo se puede observar en la figura 1-4 [9], [19].

Figura 1-4: a) Configuración varilla – plano, b) Distribución de campo eléctrico electrodos varilla – plano



Tomado de a) D. Kind [9] - b) Z. Qiu, J. Ruan, and S. Shu [19]

La configuración varilla – plano es ampliamente utilizada en ensayos de laboratorio, en el estudio del comportamiento de fallas en líneas de alta tensión, así como, en la obtención de datos de flameo para diferentes separaciones de electrodos sometidos a tensiones de conmutación [21].

## 1.5 Configuraciones geométricas simétricas

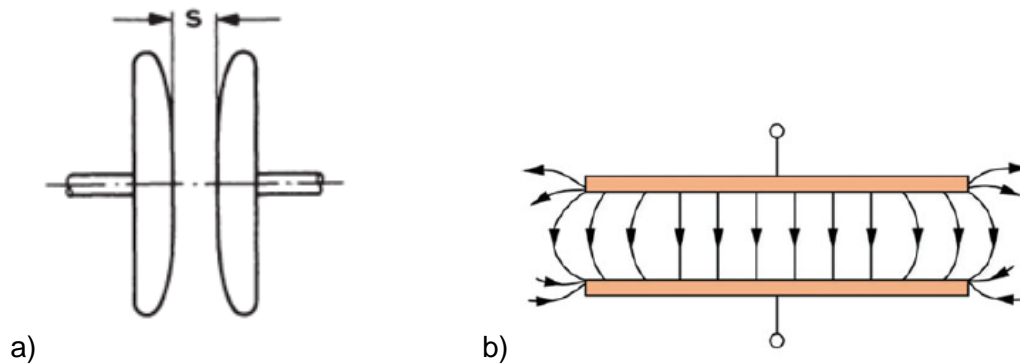
### 1.5.1 Electrodo placa – placa (campo uniforme)

Esta configuración simétrica consta de placas paralelas separadas a través de un material dieléctrico donde la distribución del campo eléctrico es uniforme, para ello se usan placas metálicas de dimensiones limitadas que permitan un adecuado control de la tensión en los



bordes. Las placas con perfil de Borda o de Rogowski [19], disminuyen la dispersión del campo eléctrico en los extremos; característica que las hace útiles en aplicaciones prácticas, como el estudio de mecanismos de rotura en alta tensión [9]. La figura 1-5, muestra la configuración de electrodos placa – placa y la distribución de campo eléctrico en este tipo de arreglo [9], [19].

Figura 1-5: a) Configuración placa – placa con perfil de Rogowski. b) Distribución de campo eléctrico electrodos placa – placa



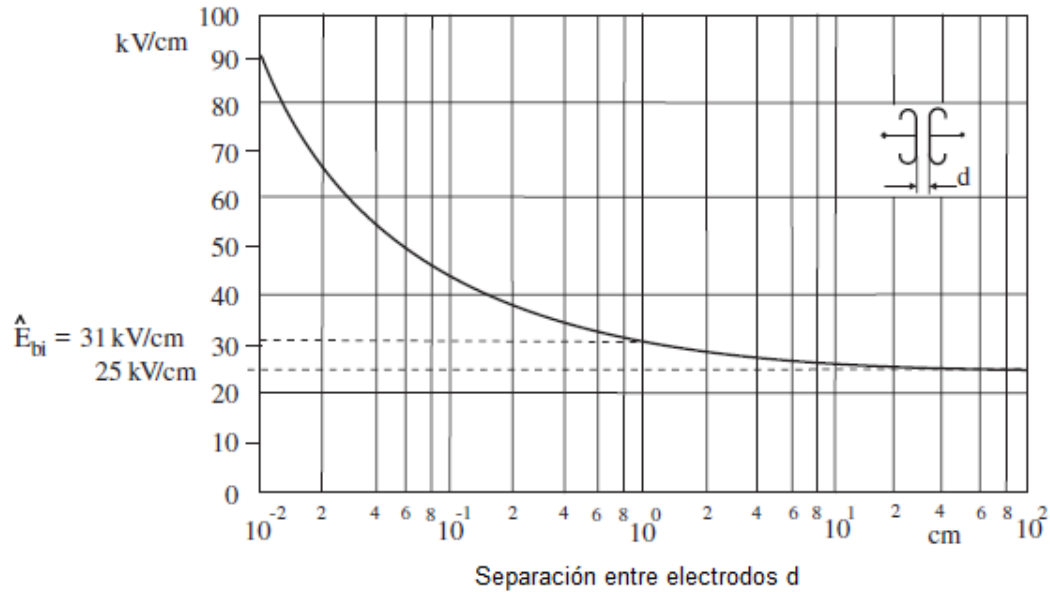
Tomado de a) D. Kind [9] - b) Z. Qiu, J. Ruan, and S. Shu [19]

Los electrodos con perfil de Rogowski a diferencia de los electrodos planos, donde la disrupción tiende a ocurrir en los bordes de los electrodos y no en el centro, no presentan dispersión del campo eléctrico en los bordes, formando líneas de campo equipotenciales, permitiendo que los ensayos presenten menos perturbaciones, aunque estas dependerán de la tensión y del dieléctrico usado entre placas [6], [7]. En la figura 1-6 se observa la característica de la tensión de rotura en campo uniformes en aire atmosférico.

En campos uniformes, por la Ley de Paschen, se tiene que la tensión de rotura y la rigidez dieléctrica en aire en condiciones normalizadas de temperatura y presión es:

$$\widehat{U}d = 6,72\sqrt{d} + 24,36d \text{ (kV)} \quad \text{ó} \quad \widehat{E} = 24,36 + \frac{6,72}{\sqrt{d}} \left( \frac{\text{kV}}{\text{cm}} \right)$$

Figura 1-6: Característica de la tensión de rotura en campo uniformes en aire atmosférico

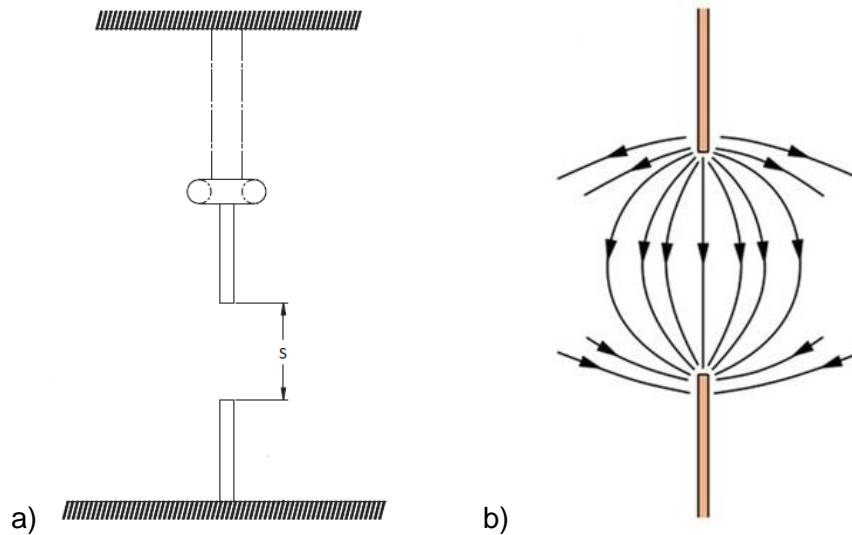


Tomado de R. Arora and W. Mosh [2]

### 1.5.2 Electrodo varilla – varilla (campo extremadamente no uniforme)

Este arreglo consta de dos electrodos de varilla de sección cuadrada montados sobre soportes aislantes, cuyas disposiciones pueden ser horizontal o vertical [4], [22]. En este tipo de configuración geométrica, el campo eléctrico presenta una distribución extremadamente no uniforme; que depende principalmente de las dimensiones de las varillas y de la longitud del espacio entre ellas. En cuanto a la intensidad de campo, esta disminuye a medida que aumenta la separación entre electrodos [23]. La tensión de rotura aumenta de manera lineal con el incremento de la densidad relativa del aire y las variaciones de la presión atmosférica [21]. En la figura 1-7, se presenta el esquema de la configuración varilla – varilla de acuerdo con la norma IEEE Std 4 – 2013 y la distribución de campo eléctrico entre electrodos [4] [19].

Figura 1-7: a) Configuración varilla – varilla b) Distribución de campo eléctrico no uniforme.



Tomado de a) IEEE Std 4 - 2013 [4] - b) Z. Qiu, J. Ruan, and S. Shu [19]

Dentro del ámbito de pruebas, la configuración varilla - varilla se usa para la medición de tensiones DC; en este último caso, la dispersión del campo eléctrico no se ve alterada por las partículas circundantes en el espacio (aire atmosférico) entre electrodos, en comparación con otras disposiciones [2], [16]. De acuerdo con las normas IEC 60052 – 2002 e IEEE Std 4 – 2013, para tensiones en DC entre 20 y 1300 kV, con esta configuración se puede obtener una incertidumbre de medición aproximada del 2%, teniendo en cuenta los factores de corrección para la humedad y la densidad del aire.

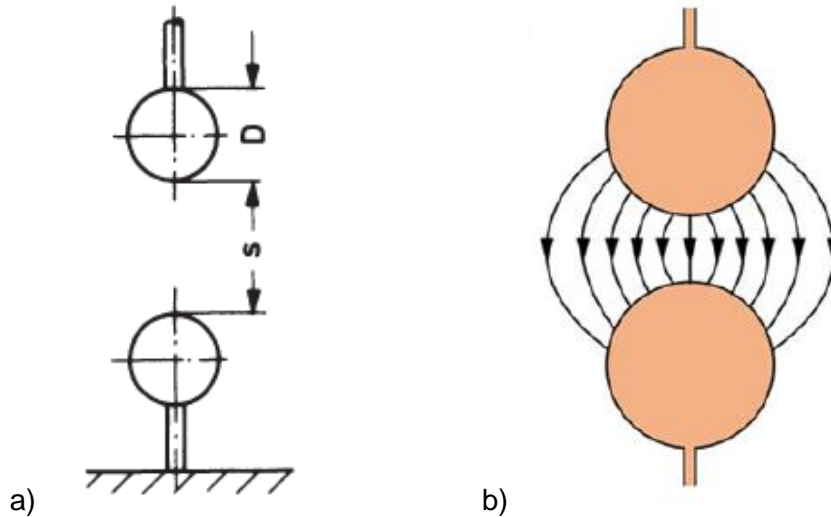
A menudo se emplea como dispositivos simples de protección contra sobretensiones en redes trifásicas de alta tensión [9]. Debido a la gran variación en la tensión de rotura y la incertidumbre asociada con la influencia de la humedad. Esta configuración dejó de utilizarse para la medición de AC o tensión de impulso [21].

### 1.5.3 Electrodo esfera – esfera (campo débilmente no uniforme)

Esta configuración consiste en dos esferas metálicas de diámetros iguales enfrentadas, cuya distancia de separación se limita bajo condiciones de distribución de campo eléctrico casi homogéneo; la pequeña falta de homogeneidad del campo depende principalmente del diámetro de las esferas y la separación entre ellas, de modo que no aparece ninguna descarga previa (corona) antes de la rotura [4], [22]. La figura 1-8, muestra la configuración

de electrodos esfera – esfera y la distribución de campo eléctrico entre estos elementos [9], [19].

Figura 1-8: a) Configuración esfera – esfera. b) Distribución de campo eléctrico electrodos esfera – esfera.



Tomado de a) D. Kind [9] - b) Z. Qiu, J. Ruan, and S. Shu [19]

El valor máximo de la intensidad de campo a la tensión de rotura cambia ligeramente con la longitud del espacio entre esferas, mostrando alta estabilidad y baja dispersión, mientras que la tensión de rotura puede considerarse que aumenta linealmente con la longitud del espacio [23]. Ver Anexo B.

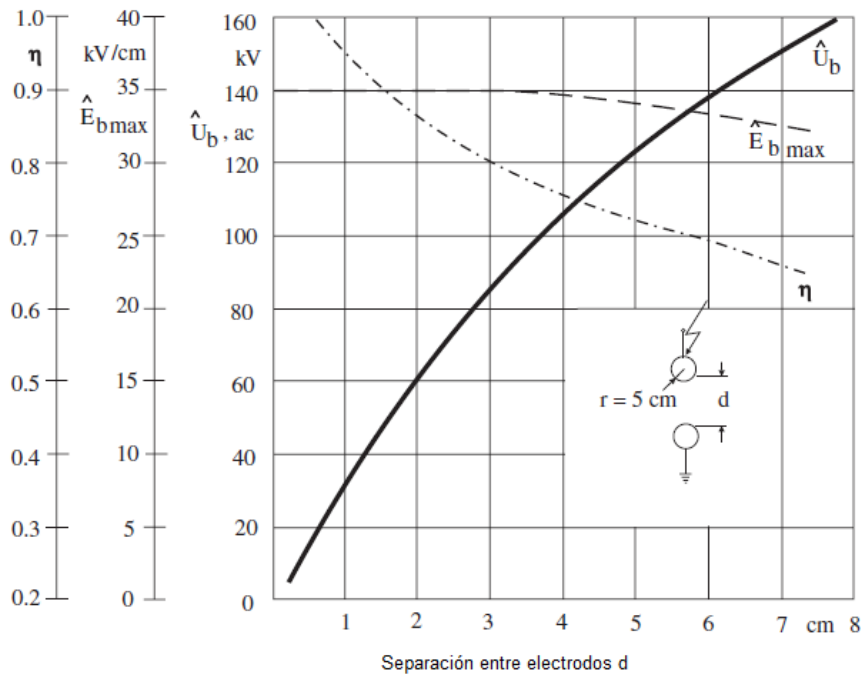
Los explosores de esferas no son recomendados para ser usados en DC debido al comportamiento errático de la descarga entre electrodos producida por las partículas en suspensión entre los mismos, ocasionando descargas disruptivas a tensiones inferiores a las calculadas a partir de las dimensiones y separación de las esferas.

Una ventaja notable de los explosores de esferas consiste en que, bajo parámetros atmosféricos controlados como la presión del aire, la temperatura, la humedad y la velocidad del viento, la rotura ocurre dentro de unos pocos  $\mu\text{s}$ , una vez la tensión aplicada exceda la tensión de rotura. Durante un período tan corto, el valor pico de la tensión a frecuencia industrial puede considerarse constante, lo que conlleva a que pueda ser usado en múltiples aplicaciones [19]; como en circuitos en cascada para generación de altas

tensiones en DC e impulso; también se usan, como electrodos de protección contra sobretensiones.

La figura 1-9 presenta: la variación en la tensión de rotura en AC en aire, la máxima intensidad de campo de rotura entre electrodos y el factor de Schwaiger con una distancia de separación entre electrodos, en campos débilmente no uniformes [2].

Figura 1-9: Variación en la tensión de rotura en AC en aire atmosférico en condiciones normalizadas



Tomado de R. Arora and W. Mosh [2]

Actualmente, su principal aplicación está en la verificación de desempeño de Sistemas de Medición Aprobados (Approved Measurement Systems, AMS) o verificaciones de linealidad de tales sistemas [7]. Otro uso de importancia de los explosores de esferas es como interruptor activado por tensión, característica que lo hace deseable para ser utilizado en los generadores de impulso.

Los explosores de esferas se han utilizado para la medición de tensión pico desde las primeras décadas del siglo XX, sin embargo, esta aplicación ha quedado en desuso y no desempeñan el mismo papel en los laboratorios de alta tensión que en el pasado.

---

Las normas IEC 60052 – 2002, IEC 60060 1- 2010 e IEEE Std 4 – 2013, así como, diferentes autores detallan las recomendaciones concernientes al dimensionamiento, construcción y uso de explosores de esfera estándar, para diámetros de esferas entre 2 y 200 cm.



## **2. Dimensionamiento de explosores de esferas para medida**

Para efectos prácticos, a los explosores de esferas que actúan como interruptores activados por tensión (como es el caso de los usados en los generadores de impulso), les aplican las mismas disposiciones, dimensiones, etc., contenidas en las normas referentes a los explosores empleados para verificación de medidas.

### **2.1 Requerimientos generales**

El explosor de esferas consiste en dos esferas enfrentadas de diámetros iguales, que están separadas entre sí por una distancia válida indicada en las normas en el rango  $[0,05D \leq S \leq 0,75D]$ , siendo D el diámetro de las esferas y S la separación entre estas. Se recomienda que la separación S no sea inferior a  $0,05D$ , dado que, puede ser difícil medir y ajustar la separación con suficiente precisión, si la relación entre S y D es muy pequeña. Además, debe notarse que a partir de una separación de esferas  $S \geq 0,5D$  el campo eléctrico se torna menos homogéneo y en consecuencia ningún nivel de confianza se asigna al valor de tensión de rotura o cebado.

La configuración esfera – esfera permite que no exista una descarga previa o efecto corona antes que se alcance la rotura; para que esta condición se cumpla, el dispositivo debe contar con una geometría controlada (diámetro, esfericidad y separación de electrodos que garantice campo cuasi homogéneo) como ya se ha indicado, al igual que las condiciones atmosféricas del entorno, dado que todas estas influyen en la tensión de rotura [15]. Estas condiciones están enmarcadas en las normas IEC 60052 – 2002 e IEEE Std 4 – 2013, donde se establecen los requerimientos generales para la construcción de explosores de esferas.



El explosor de esferas estándar consta además de soportes, engranajes, vástagos y cables de conexión que permitan su adecuado funcionamiento, el cual puede ser complementado mediante el accionamiento motorizado de la graduación del espacio entre las esferas.

## **2.2 Forma y condiciones de la superficie de las esferas**

De acuerdo con las normas mencionadas, los valores estándar del diámetro D de las esferas son: 2 cm, 5 cm, 6,25 cm, 10 cm, 12,5 cm, 15 cm, 25 cm, 50 cm, 75 cm, 100 cm, 150 cm y 200 cm. La curvatura debe ser lo más uniforme posible, caracterizada por una diferencia no mayor al 2% del valor nominal; para la verificación de este parámetro podrá ser usado un instrumento adecuado como por ejemplo un esferómetro u otro de mayor precisión.

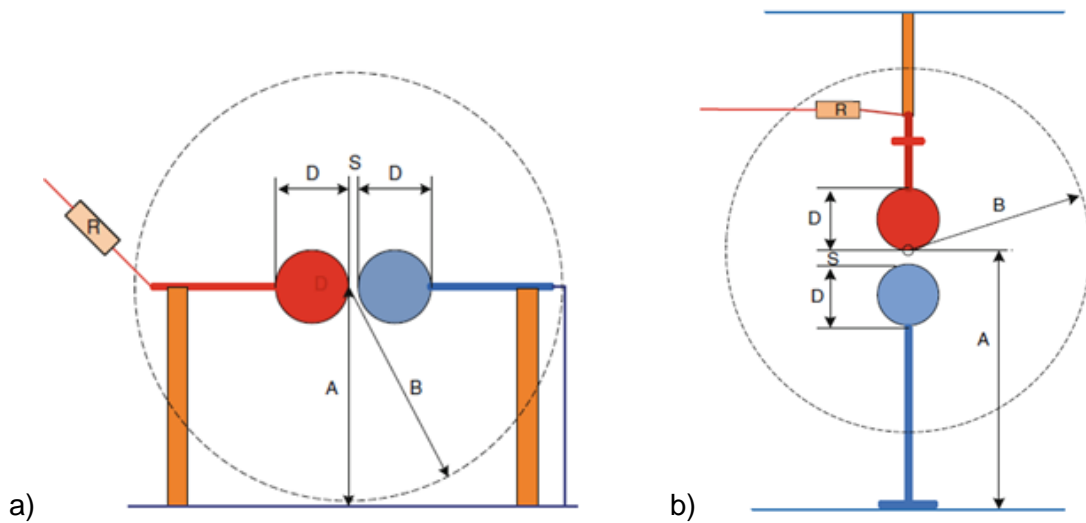
Las esferas deberán estar razonablemente libres de irregularidades en la superficie, prestando especial atención a la región del punto de chispa (ver glosario). Se recomienda que la rugosidad de la superficie de las esferas no supere las 10  $\mu\text{m}$ . Los daños menores en la superficie de la esfera, siempre y cuando no esté involucrada el área donde se desarrolla el proceso de rotura, no deterioran el desempeño del explosor [7], [9].

## **2.3 Disposición física del explosor**

Las normas definen dos configuraciones estándar para los explosores de esferas, vertical y horizontal, que se pueden observar en la figura 2-1 [7], además, establecen las distancias y medidas con otros objetos circundantes, considerando que estos pueden influir en los resultados de las mediciones y/o en el funcionamiento del dispositivo (cebado de la descarga).

Para el caso de los elementos como el vástago (y engranaje de operación), que se encuentren conectados a tierra, no se especifican dimensiones precisas ya que estos componentes tienen una influencia menor en la prueba, comparado con el efecto de las esferas.

Figura 2-1: Disposición física de los explosores de esferas. a) Horizontal, b) Vertical



Tomado de W. Hauschild; E. Lemke [7]

## 2.4 Espacios libres alrededor de las esferas

Los espacios libres A y B alrededor de las esferas garantizan que no existan descargas con otros elementos próximos a los electrodos. Estas distancias están definidas desde el punto de chispa de la esfera sobre la cual se aplica la tensión, hasta cualquier objeto circundante como techos, paredes u otros elementos conectados a tierra, incluyendo el soporte de las esferas, en caso de estar hecho de material conductor.

Para las estructuras de soporte fabricadas en materiales aislantes, no se requiere el cumplimiento de las distancias, siempre que se encuentren limpias y secas.

En los laboratorios de pruebas donde estas distancias no se puedan cumplir, la norma establece algunos criterios para que se puedan desarrollar los ensayos, para ello es necesario que: no se produzcan descargas disruptivas a otros objetos; no exista descarga visible desde el cable de alta tensión o del vástago dentro del espacio definido por B y no existan descargas visibles de otros objetos conectados a tierra que se extiendan hacia el espacio definido por B.

En la tabla 2-1 se presentan los valores de las longitudes A y B que deberán permanecer libres alrededor de los electrodos [4].

Tabla 2-1: Espacios libres alrededor de las esferas.

Diámetro esfera D (cm)	Valor mínimo altura A	Valor máximo altura A	Valor máximo distancia B
Hasta 6,25	7 D	9 D	14 S
10 a 15	6 D	8 D	12 S
25	5 D	7 D	10 S
50	4 D	6 D	8 S
75	4 D	6D	8 S
100	3,5 D	5 D	7 S
150	3 D	4 D	6 S
200	3 D	4 D	6S

Tomado de IEEE Std 4 – 2013 [4]

Donde, D es el diámetro de las esferas  
S es la separación entre esferas

## 2.5 Conexiones

Las esferas estarán conectadas normalmente una a tierra y otra a la alta tensión a través de una resistencia, cuya función es eliminar oscilaciones (sobretensiones) en la tensión aplicada entre los electrodos.

Las demás conexiones deberán cumplir con las distancias establecidas en la norma, de tal forma que no se afecte el espaciamiento descrito anteriormente.

## 2.6 Tensión de descarga disruptiva

La tabla 2-2 presenta los valores pico de tensión de rotura 50% en AC, DC, impulso de rayo (LI) e impulso de maniobra (SI) positivos y negativos para algunos explosores de esferas normalizados [4], [22].

Tabla 2-2: Valores pico de tensión de rotura para algunos explosores de esfera normalizado.

Valores pico de tensión de ruptura 50% [kV]										
Separación entre esferas S [mm]	Diámetro de esferas D (mm)									
	100		125		150		250		500	
	AC, DC, -LI, -SI	+LI, +SI	AC, DC, -LI, -SI	+LI, +SI	AC, DC, -LI, -SI	+LI, +SI	AC, DC, -LI, -SI	+LI, +SI	AC, DC, -LI, -SI	+LI, +SI
5	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8				
10	31.7	31.7	31.7	31.7	31.7	31.7	31.7	31.7		
15	45.5	45.5	45.5	45.5	45.5	45.5	45.5	45.5		
20	59	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0
30	84	85.5	85.0	85.5	85.5	85.5	86.0	86.0	86.0	86.0
50	123	130	129	134	133	136	137	138	138	138
60	(138)	(148)	146	155	152	158	161	163	164	164
75	(155)	(170)	(168)	(181)	177	187	195	199	202	202
100			(195)	(215)	(209)	(226)	244	254	263	263
150							(314)	(337)	373	380
200							(366)	(395)	460	480
300									(585)	(620)
400									(670)	(715)

Tomado de IEEE Std 4 – 2013 [4], IEC 60052 – 2002 [22]

Donde,

AC – tensión alterna

DC – tensión directa

-LI (lightning impulse) – impulso de rayo de polaridad negativa

+LI (lightning impulse) – impulso de rayo de polaridad positiva

-SI (switching impulso) – impulso de conmutación de polaridad negativa

+SI (switching impulso) – impulso de conmutación de polaridad positiva

Los valores pico de tensión de rotura 50% son tomados de las normas IEEE Std 4 – 2013 e IEC 60052 – 2002, bajo condiciones atmosféricas estándar de temperatura ( $t_0 = 20^\circ\text{C} = 293^\circ\text{K}$ ), presión absoluta ( $b_0 = 101,3 \text{ kPa} = 1013 \text{ mbar}$ ) y, humedad absoluta ( $h_0 = 11 \text{ g/m}^3$ ).

Los valores pico de tensión de rotura 50% mostrados para cada diámetro de esferas D, corresponden a distintas separaciones S válidas entre ellas [ $0,05D \leq S \leq 0,5D$ ]. Los valores mostrados para la tensión de descarga disruptiva tienen una incertidumbre estimada del 3% para un nivel de confianza no menor al 95% para AC e impulso.

## 2.7 Consideraciones adicionales para la implementación

El área de ensayos en Alta Tensión del Laboratorio de Electricidad y Electrónica de la Universidad Nacional - sede Manizales, cuenta con algunos componentes de un equipo comercial multipropósito modular, que puede configurarse para generar altas tensiones en AC, DC e impulso actualmente hasta una tensión de 140 kV pico, que mediante la adición de componentes apropiados permitiría ampliar su rango de 2 a 4 veces este valor. Uno de estos componentes comerciales modulares es el explosor de esferas adquirido en 2009, con el cual se puede obtener ondas de impulso hasta 140 kV pico.

Con la posibilidad de agregar un nuevo explosor, se podría ampliar el rango de tensiones de prueba. Para este fin se propone el diseño, dimensionamiento y construcción de un explosor de esferas compatible con el equipo comercial y modular existente, a través de dos posibles alternativas de desarrollo.

La primera consistente en una réplica del explosor comercial y la segunda en desarrollar un explosor modular multietapa; posibilitando ambas alternativas su acople con los componentes modulares existentes. En el caso de la réplica es claro que las dimensiones de las esferas deben ceñirse al modelo original ( $D = 10$  cm).

De acuerdo con la tabla 2-2 en la columna correspondiente a esferas de 100 mm con una separación de  $0,5D$ , se observa una tensión máxima confiable de 123 kV. Este es el valor de tensión pico de impulso obtenido considerando las eficiencias típicas de los generadores de impulso ( $\eta_g$ ) cercanas al 90% ( $V_{\text{pico}} \approx \eta_g V_{\text{dc}}$  donde  $V_{\text{dc}} = 140$  kV). En consecuencia, esferas de 100 mm corresponden a las dimensiones mínimas que deben usarse para interruptores controlados por tensión (explosores de esferas), para tensiones nominales de 140 kV por etapa.

Esferas normalizadas de 125 mm posibilitan tensiones pico confiables hasta 146 kV, las cuales abarcan tensiones nominales normalizadas de 150 kV por etapa. Esferas de este diámetro se consideran una opción adicional (segunda alternativa) para el desarrollo del explosor modular multietapa.

De manera generalizada, los explosores de esferas usados como interruptores controlados por tensión se disponen horizontalmente en los generadores de impulso. La figura 2-2 muestra un ejemplo de la disposición horizontal de los explosores en un generador de impulsos.

Además del tamaño de las esferas, las consideraciones expuestas a lo largo de este capítulo referentes a las dimensiones de los explosores deben satisfacerse en las dos alternativas propuestas. La figura 2-2 muestra un generador de impulsos con explosores de esferas en tándem [24].

Figura 2-2: Explosores de esfera en un generador de impulsos



Tomada de <https://www.ntplindia.com/impulse-voltage-generator> [24]



## **3. Construcción del prototipo**

Los explosores de esferas para aplicaciones comerciales de alta tensión conllevan piezas y/o componentes aislantes y también metálicos. Las primeras están relacionadas con soportes, encapsulados y/o separadores, los cuales garantizan la separación dieléctrica de las esferas y su firme y correcta sujeción y alineación.

Los componentes metálicos, tales como esferas, bujes, ejes, tornillos sin fin, engranajes, etc., aseguran la conductividad del dispositivo, facilitando el movimiento preciso y la separación de las esferas y garantizan con sus materiales la presencia mínima de campos magnéticos, lo que implica recurrir a metales no magnéticos libres (o en cantidades reducidas) de hierro, níquel, cobalto, tales como, aluminio, bronce, cromo, tungsteno, cobre, etc., de alta pureza y usualmente recubiertos de materiales resistentes a la abrasión superficial producida por las descargas eléctricas. Estos materiales generalmente son más costosos que los abundantes materiales magnéticos.

Las descargas eléctricas entre esferas se pueden generar bien sea de forma natural (cebado natural), controlando su separación o su diferencia de tensión, o de forma asistida (controlada) mediante mecanismos auxiliares de disparo. Descripciones de la generación de la descarga y algunos de sus mecanismos de disparo son mencionados en la referencia [25]. De otra parte, la referencia [26], aborda un mecanismo motorizado para el control de la separación de las esferas, asociado con un cebado natural de la descarga.

### **3.1 Alternativa 1. Réplica del explosor comercial**

Concebida como la alternativa deseable al replicar el explosor existente, debido a su mayor complejidad y los costos asociados, su desarrollo se llevó hasta la concepción en planos. A modo de ejemplo se menciona el costo de esferas comerciales de 10 cm para el uso en



explosores con un valor cercano a US\$550,00 la unidad, sin incluir fletes ni impuestos de importación.

De otra parte, en el año 2020 se obtuvo una cotización del explosor compatible con el equipo modular existente en el laboratorio, con un proveedor local por un valor cercano a US\$2.500,00.

Los planos se desarrollaron bajo pedido, de manera profesional por una empresa de ingeniería metalmecánica. Dichos planos con todas las especificaciones del dispositivo quedan disponibles para su materialización, a través de un proveedor idóneo. Diferentes vistas de la réplica del explosor se presentan en el Anexo C.

La figura 3-1, muestra el explosor de esferas comercial existente en el Laboratorio de Electricidad y Electrónica. En las figuras 3-2, 3-3 y 3-4, se presentan gráficas basadas en los planos obtenidos del explosor de esferas original.

Figura 3-1: Explosor de esferas comercial



Tomado de <http://wstestsystems.com/sphere-gap.html#prettyPhoto> [27]

Figura 3-2: Explosor de esferas - corte axial longitudinal

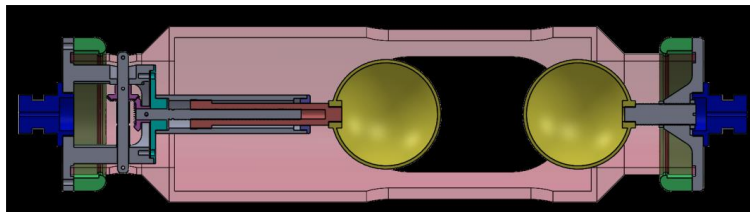


Figura 3-3: Explosor de esferas sin encapsulado

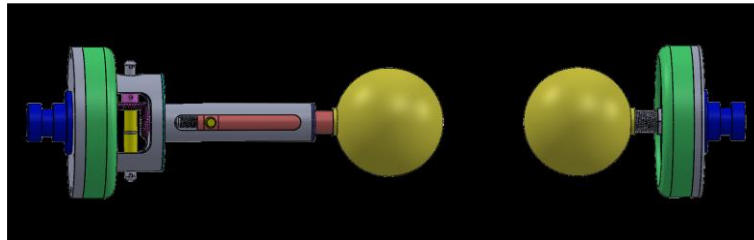
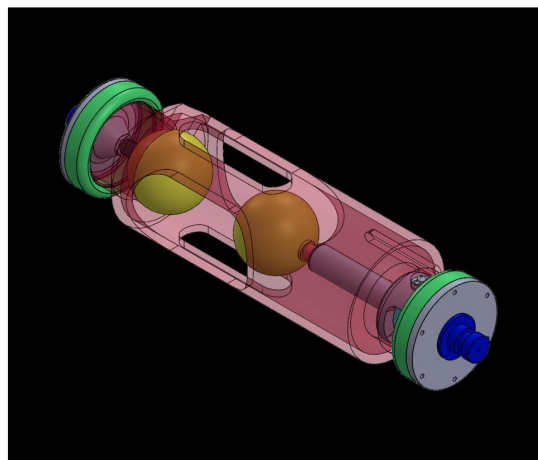


Figura 3-4: Explosor de esferas - perspectiva general



### 3.2 Alternativa 2. Explosor modular multietapa

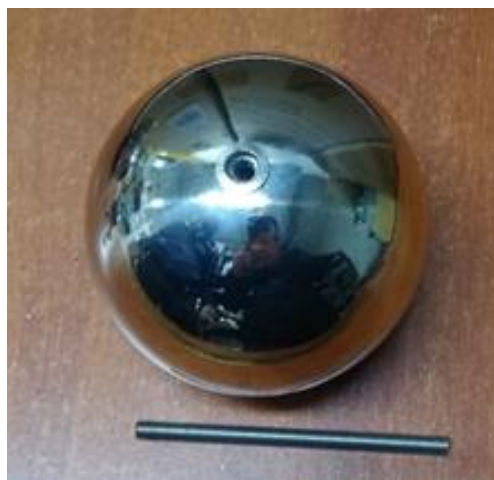
El prototipo se construyó de manera modular, de forma que permite el ensamble de hasta 4 etapas de explosores y su conexión con el equipo existente. Su característica modular permite ensamblar a conveniencia tantos niveles de explosores como se requiera y hasta 4, para una tensión nominal máxima de  $4 \times 140 \text{ kV}_{\text{pico}}$ .

Para la elección de los materiales usados en la construcción del prototipo y las distancias entre elementos, se tuvieron en cuenta, en la medida de lo posible, las recomendaciones establecidas en las normas IEC 60052 – 2002 e IEEE Std 4 – 2013. La implementación de esta alternativa tuvo en consideración la disponibilidad de materiales asequibles que permitieron su desarrollo.

### 3.3 Electrodo

De acuerdo con las recomendaciones de las normas, el material para la construcción de las esferas, debe ser buen conductor y suficientemente resistente al desgaste superficial por cuenta de las descargas. Esferas huecas de aluminio, duraluminio, cobre o bronce de entre 3 mm y 5 mm de espesor con revestimientos duros se emplean para este fin.

Figura 3-5: Esfera en acero cromado con diámetro aproximado de 10 cm.



Dada la imposibilidad económica de disponer de esferas con las anteriores características, se recurrió a la importación de esferas más económicas en acero cromado de 1mm de espesor con rosca de sujeción M6 y diámetro levemente inferior a los 10 cm (96 mm aprox.). La figura 3-5 muestra una sola de estas esferas. La figura 3-6, presenta el esferómetro adquirido para el proyecto, este instrumento permite determinar la esfericidad de objetos.

Figura 3-6: Esferómetro



### 3.4 Vástagos y fleje de conexión eléctrica

Las esferas están soportadas por vástagos, que a su vez se apoyan sobre una estructura en PVC; para estos elementos se usaron varillas cilíndricas de aluminio de 45 cm de largo, con un diámetro de  $\frac{3}{4}$ " o 1,9 cm, con perforaciones roscadas M6 (6 mm) en ambos extremos, como se muestra en la figura 3-7.

Figura 3-7: Vástago de soporte y tornillo de sujeción



El diámetro del vástago se eligió de acuerdo con las especificaciones de la norma IEEE Std 4 – 2013, en esta se define que el diámetro del vástago deberá ser  $\leq 0,2D$ , donde  $D$  es el diámetro de la esfera. Para la esfera de 10 cm de diámetro, el vástago usado no debe superar los 2 cm, lo cual se cumple con el vástago arriba indicado.

La figura 3-8 muestra el vástago usado en el prototipo y la figura 3-9 muestra el ensamble completo porta-electrodos, con fleje de bronce para conexión eléctrica con los demás elementos del generador de impulsos.

Figura 3-8: Fleje de bronce, tornillo de sujeción, vástago y esfera



Figura 3-9: Ensamble completo de fleje de bronce, tornillo de sujeción, vástago y esfera



El vástago cuenta con un extremo de terminación recta, que servirá para la conexión del explosor al equipo modular del laboratorio, a través de un fleje de bronce sostenido por la mariposa de sujeción de rosca M6, tal como se muestra en el lado izquierdo de las figuras 3-8 y 3-9. El extremo derecho del vástago con terminación cónica sostiene la esfera del explosor como se observa en las figuras antes mencionadas.

Figura 3-10: Tornillo mariposa de sujeción rosca 6 mm

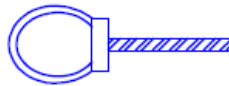


Figura 3-11: Fleje de bronce

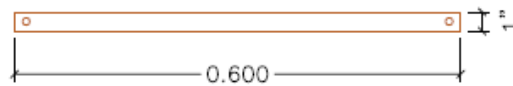
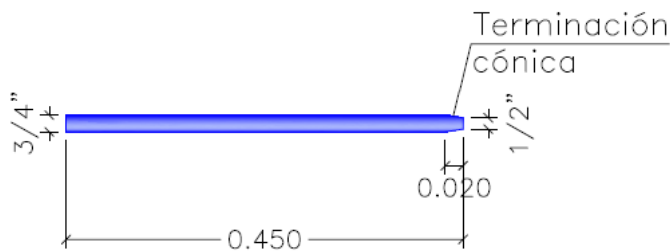


Figura 3-12: Vástago

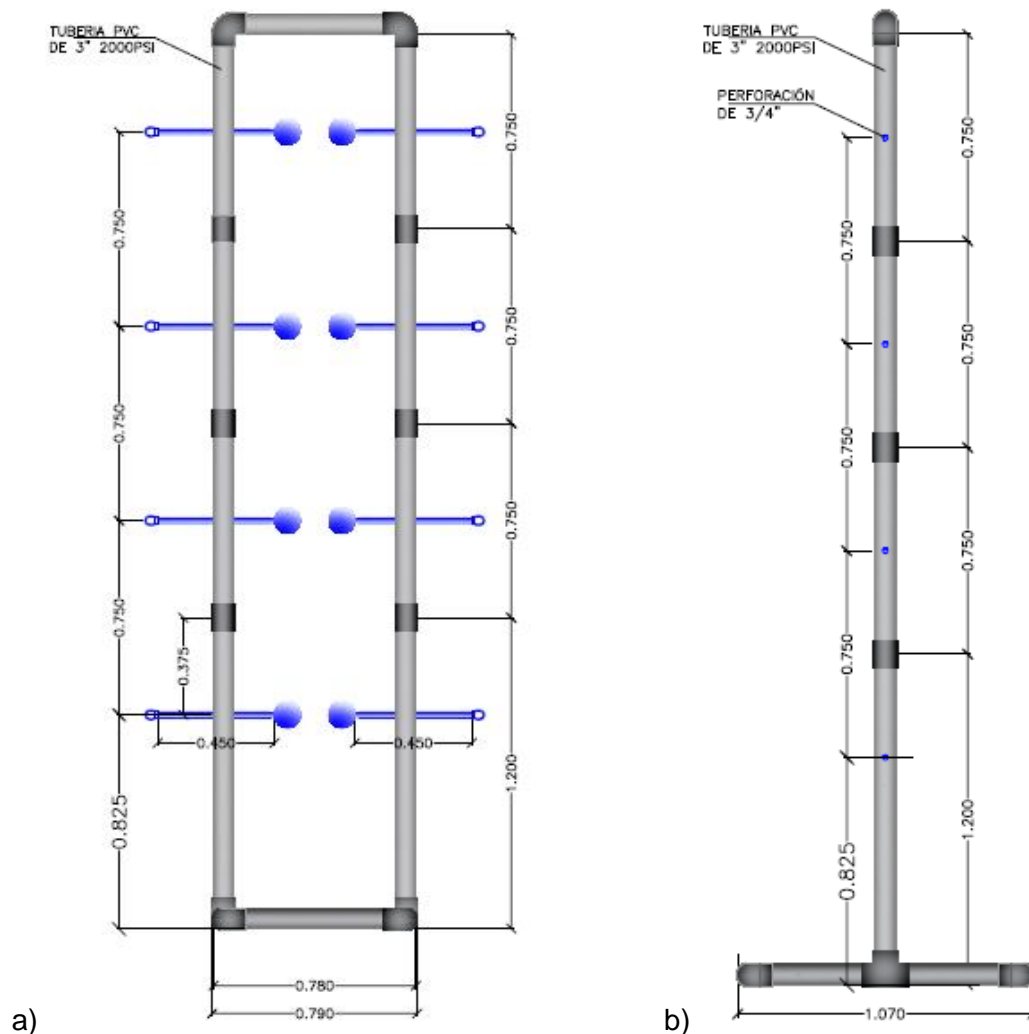


Para las conexiones eléctricas con el resto de los elementos del generador de impulsos se emplean flejes en lugar de conductores cilíndricos en virtud de que la disposición de los primeros presenta una menor inductancia con respecto a los segundos, para secciones transversales equivalentes. Se busca reducir estas inductancias al máximo, debido a que en conjunto con los capacitores del generador de impulso pueden producir oscilaciones indeseables en la forma de onda tipo rayo. Una reducción mayor de la inductancia se puede lograr mediante el uso de una doble capa de fleje para las conexiones.

### 3.5 Estructura y dimensiones del prototipo

Para la construcción de la estructura de soporte se utilizó tubería de PVC de alta presión 3" – 2000 PSI, este material es conocido por sus buenas características dieléctricas y mecánicas (resistencia, rigidez, dureza, peso, etc.). La figura 3-13 muestra el esquema general tanto frontal como lateral del prototipo completo con sus 4 etapas y sus dimensiones correspondientes.

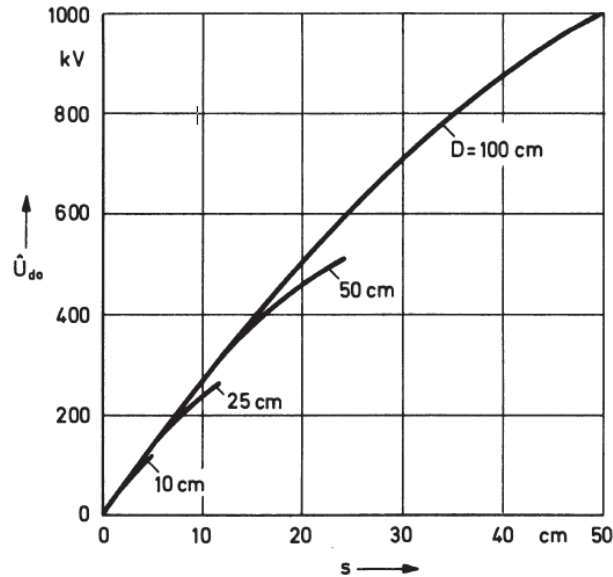
Figura 3-13: Esquema general del prototipo ensamble de 4 etapas. a) vista frontal, b) vista lateral.



El acople modular de las piezas, se hace a través de uniones, codos y tees de PVC compatibles de 3". El ajuste de la separación entre las esferas del prototipo se debe realizar de forma manual, para esto se posicionan las esferas a la distancia dada para la tensión

de prueba requerida, tal como se muestra en las figuras 3-14 y 1-9 para esferas de 10 cm de diámetro [9].

Figura 3-14. Tensión de rotura de explosor de esferas en función de su separación



Tomado de D. Kind [9]

Como se describió anteriormente, el prototipo está concebido de tal forma que pueda ensamblarse un máximo de 4 etapas. El número de etapas a ensamblar dependerá del nivel de tensión requerido, considerando que cada etapa alcanza una tensión nominal pico de 140 kV.

Como ejemplo, un transformador con tensión nominal de 33 kV satisface una tensión máxima de aislamiento de 36,2 kV de acuerdo con la norma [28], pudiendo requerir ensayos de impulso tipo rayo hasta de 200 kV pico, tensión que no se logra con 1 sola etapa, pero que si se alcanza con 2 etapas del generador de impulsos disponible (2 explosores en tándem). Ver figura 2-2.

Para lograr 100 kV pico en cada una de las 2 etapas del ejemplo anterior, asumiendo condiciones atmosféricas normalizadas (ver sección 2.6), la separación entre esferas deberá ubicarse alrededor de 3,75 cm, de acuerdo con los datos de la tabla 2-2.

Las figuras 3-15 y 3-16 muestra el explosor de esferas para 1, 2 y 3 etapas.

Figura 3-15: Ensamble del prototipo a) 1 etapa, b) 2 etapas

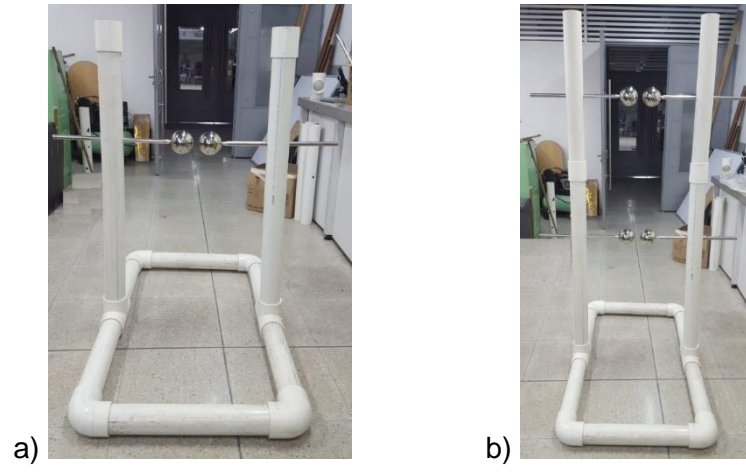


Figura 3-16: Imagen del prototipo armado con 3 etapas





El ensamble completo de las 4 etapas no supera los 3,6 m. La primera etapa de explosores se encuentra a una altura de 0,82 m, la segunda a 1,57 m, la tercera a 2,32 m y la cuarta y última a 3,07 m. La separación entre niveles de explosores satisface las distancias libres recomendadas.

### 3.6 Costos del proyecto

Los costos asociados al proyecto corresponden a la cuantificación de los recursos para el alcance de las 2 alternativas propuestas, como se indica en las tablas 3-1 y 3-2.

Tabla 3-1. Recursos materiales

MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	SUBTOTAL
Tubo PVC 3" - 2000 PSI - 6 m	un	2	\$ 221.900	\$ 443.800
Union PVC 3"	un	6	\$ 16.500	\$ 99.000
Tee PVC 3"	un	2	\$ 43.800	\$ 87.600
Codo PVC 3"	un	6	\$ 42.900	\$ 257.400
Varilla redonda de aluminio 3/4"	m	4	\$ 28.000	\$ 112.000
Varilla de acero roscada M6	m	4	\$ 12.000	\$ 48.000
Machuelo M6	un	1	\$ 30.000	\$ 30.000
Lamina de bronce retal	un	1	\$ 48.000	\$ 48.000
Lijas	un	4	\$ 3.000	\$ 12.000
Esferas acero cromado D 10 cm	un	8	\$ 40.000	\$ 320.000
Esferómetro	un	1	\$ 120.000	\$ 120.000
Reproducción de planos	global	1	\$ 950.000	\$ 950.000
				\$ 2.527.800

Tabla 3-2 Recursos bibliográficos esenciales

NORMAS EDICIÓN DIGITAL	VALOR
IEEE Std 4 - 2013	US\$ 240
IEC 60052 - 2002	CHF\$ 190
IEC 60060 - 1	CHF\$ 337

## **4. Resultados, discusiones, conclusiones, recomendaciones y perspectivas**

### **4.1 Resultados, discusiones y conclusiones**

De este trabajo se obtuvo un prototipo de bajo costo, cuyo funcionamiento no ha sido posible verificar (con los equipos existentes, dada la no disponibilidad del área de pruebas desde inicios de 2018); también se obtuvieron los planos detallados del explosor comercial existente.

Con el prototipo del explosor construido, se dispone de un elemento adicional para avanzar hacia la consolidación de un generador de impulsos multietapa y portable con base en el equipo modular multipropósito de alta tensión disponible.

El ensamble del explosor multietapa efectuado en este trabajo, permitirá alcanzar hasta 400 kV de tensión pico de impulso con los tres capacitores disponibles (25 nF - 140 kV). La verificación de este alcance se podrá efectuar una vez se disponga de un espacio de ensayos en la Universidad que cuente con las condiciones requeridas para los mismos.

El ensamble también permitirá alcanzar hasta 200 kV de tensión pico de impulso recortado de rayo, reconfigurando por mitades independientes las cuatro etapas del explosor; una mitad de los explosores (dos pares de esferas) para generar el impulso y la otra mitad para el recorte de la onda.

Para la generación de impulsos tipo rayo hasta 400 kV se requerirá disponer de elementos, tales como resistores (carga, frente y cola) y divisores de medida apropiados para la generación y medida de la magnitud de tensión mencionada.

Con la disponibilidad de un espacio de ensayos debidamente adecuado y con los elementos existentes del equipo multipropósito, se podrán efectuar pruebas individuales por etapa y en conjunto al explosor de esferas construido para la verificación de su funcionamiento.

A partir de los planos disponibles, se espera materializar una réplica del explosor de esferas comercial existente, para esto se aspira contar con el apoyo efectivo de las instancias correspondientes dentro de la Universidad.

Para la réplica del explosor comercial, se cuenta con dos cotizaciones locales por valores aproximados de US\$1350,00 y US\$1950,00 (\$1 USD = \$4.000 COP aprox.); en tanto que, la consecución del explosor comercial importado ronda los US\$2500,00.

## 4.2 Recomendaciones y perspectivas

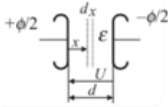
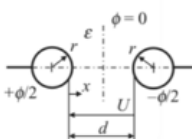
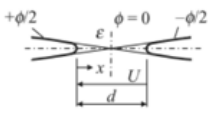
A fin de prolongar la vida útil de las esferas, es recomendable proveerlas de recubrimientos duros no magnéticos que posterguen la degradación y aparición de rugosidades en sus superficies.

Diseñar, implementar e incorporar un mecanismo para el posicionamiento preciso de las esferas, de modo que se produzca un cebado natural con una mayor precisión del nivel de tensión. Del mismo modo, incorporar un dispositivo asistido de disparo (“trigger device”), para un cebado forzado con una mayor precisión de la tensión de prueba. Siendo ambas posibilidades (soportadas en lo descrito en la introducción del capítulo 3) susceptibles de ser incorporadas al prototipo desarrollado.

También es posible proponer la implementación de un explosor de esferas de 250 mm de diámetro con dispositivo asistido de disparo, correspondiente a un nivel de tensión máxima de aislamiento de 36,2 kV, de modo que se pueda incorporar a la generación de impulsos recortados tipo rayo (BIL 200 kV) para aplicaciones de media tensión de acuerdo con [28].

Explorar la posibilidad de usar esferas con diámetros de 125 mm y 150 mm de acuerdo con la norma, que posibiliten mayor homogeneidad de campo eléctrico para el cebado de la descarga.

# ANEXO A - Esfuerzo eléctrico en un dieléctrico entre dos electrodos idénticos enfrentados en tres configuraciones diferentes [2]

Electrode System	$E(r)$ or $E(x)$	$E_{max}$	$E_{mean}$	$\eta = \frac{E_{mean}}{E_{max}}$	$E_{max}/Optimum$	Observation
Paralled Plates 	$\frac{U}{d}$	$\frac{U}{d}$	$\frac{U}{d}$	1	$\frac{U}{d}$	Uniform field
Sphere-Sphere 	(is given in a different form)	at $x = 0, d$ if $d > r$ $= 0.9 \frac{U}{2d} \left( 2 + \frac{d}{r} \right)$	$\frac{U}{d}$	$\approx \frac{2}{0.9 \left( 2 + \frac{d}{r} \right)}$	at $x = 0, d$ $= 3.67 \frac{U}{d}$ when $\frac{d}{r} = 2.08$	Nonuniform field, but for $d < 2r$ , a weakly non uniform field is achieved.
Needle-Needle (hyperbolic) 	$\frac{U \cos \alpha}{d \left[ 1 - \left( \frac{2x}{d} - 1 \right)^2 \cos^2 \alpha \right] \ln \left( \cot \frac{\alpha}{2} \right)}$	at $x = 0, d$ $\frac{U \cos \alpha}{d \left[ 1 - \cos^2 \alpha \right] \ln \left( \cot \frac{\alpha}{2} \right)}$	$\frac{U}{d}$	$\frac{(1 - \cos^2 \alpha) \ln \left( \cot \frac{\alpha}{2} \right)}{\cos \alpha}$		Extremely nonuniform field having $E_{max}$ at the electrode tips and $E_{min}$ in the middle.

$\alpha$ -asymptotic angle

## ANEXO B – Valores pico de tensión de rotura para algunos explosores de esfera normalizado [5]

Table 6.3.1-1: Peak values of 50 % breakdown voltage on uni-polar grounded sphere gap in kV for different sphere diameters  $D$  and flashover distances  $d$  for DC voltage, AC voltage and negative impulse voltage (left columns) as well as positive impulse voltage (right columns) under standard atmospheric conditions ( $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $p = 1013\text{ mbar} = 1013\text{ hPa} = 760\text{ Torr}$ ).

The impulse voltages are valid for times to half-value on wave tail longer than or equal to  $50\text{ }\mu\text{s}$ ; the polarity effect for positive impulse voltages is marked by numbers in italics (see the note in the text). Numbers presented in bold correspond to the values of the uniform field and are valid also for larger sphere diameters  $D$ . Measurement uncertainties are assumed for AC voltage and impulse voltage for  $d < D/2$  at  $\pm 3\%$  and for DC voltage for  $d < 0.8 \cdot D/2$  at  $\pm 5\%$ , the values presented in brackets refer to larger, unexplained dispersions.

$\frac{d}{\text{cm}}$	$D = 5\text{ cm}$		$D = 10\text{ cm}$		$D = 15\text{ cm}$		$D = 25\text{ cm}$		$D = 50\text{ cm}$		$D = 75\text{ cm}$		$D = 100\text{ cm}$		$\frac{d}{\text{cm}}$
0,5	17,4	17,4	<b>16,8</b>	<b>16,8</b>											0,5
1	32,0	32,0	<b>31,7</b>	<b>31,7</b>											1
1,5	45,5	46,2	<b>45,5</b>	<b>45,5</b>											1,5
Area with almost uniform field															
2	57,5	59,5	<b>59,0</b>	<b>59,0</b>											2
2,4	65,5	69,0	69,5	70,0	<b>70,0</b>	<b>70,0</b>									2,4
3	(75,5)	(81,0)	84,0	85,5	85,5	85,5	<b>86,0</b>	<b>86,0</b>							3
4	(88,5)	(97,5)	105	109	110	111	<b>112</b>	<b>112</b>							4
5			123	130	133	136	137	138	<b>138</b>	<b>138</b>					5
6			(138)	(148)	152	158	161	163	<b>164</b>	<b>164</b>					6
7			(150)	(163)	169	178	184	187	189	189	<b>190</b>	<b>190</b>			7
8					(185)	(196)	206	211	214	214	<b>215</b>	<b>215</b>			8
9					(198)	(212)	226	233	239	239	240	240	<b>241</b>	<b>241</b>	9
10					(209)	(226)	244	254	263	263	265	265	<b>266</b>	<b>266</b>	10
12					(229)	(249)	275	291	309	311	315	315	<b>318</b>	<b>318</b>	12
14							(302)	(323)	353	357	363	363	<b>366</b>	<b>366</b>	14
16	Area with increased dispersion and externally influenced field						(326)	(350)	392	402	410	411	<b>414</b>	<b>414</b>	16
18							(347)	(374)	429	442	453	458	<b>462</b>	<b>462</b>	18
20							(366)	(395)	460	480	492	505	<b>510</b>	<b>510</b>	20

Los valores de tensión en negrita corresponden a campo eléctrico cuasi homogéneo. Los valores de tensión en la parte inferior izquierda de la tabla entre paréntesis o cuyos valores no aparecen, corresponden a campo extremadamente no homogéneo.



## ANEXO C - Vistas réplica explosor

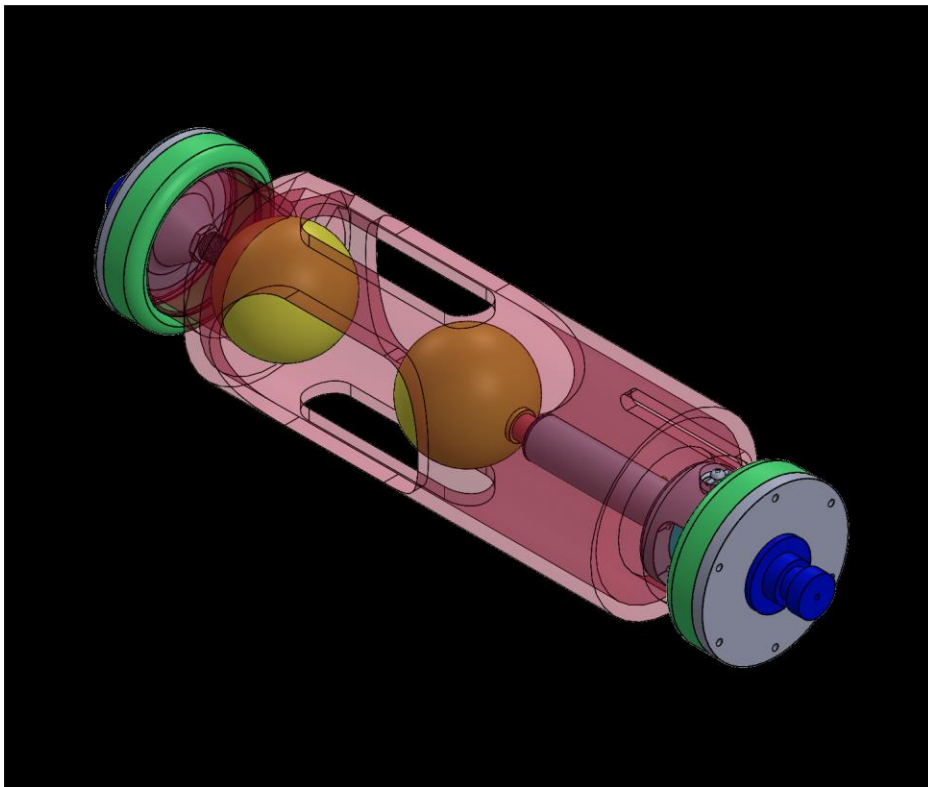


Figura C-1. Ensamble general

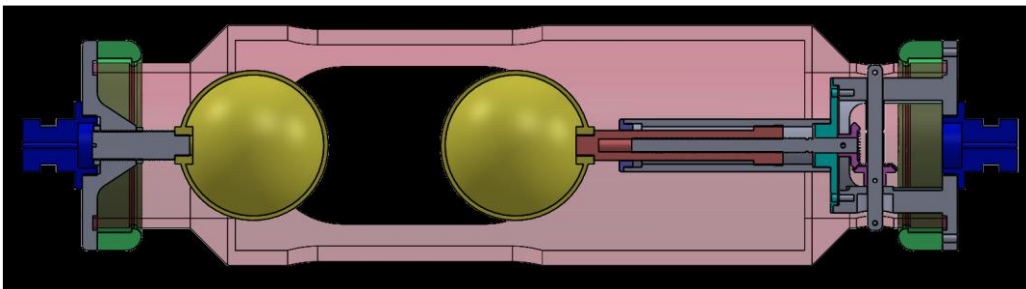


Figura C-2. Ensamble general separación de esferas 75 mm



Figura C-3. Encapsulado

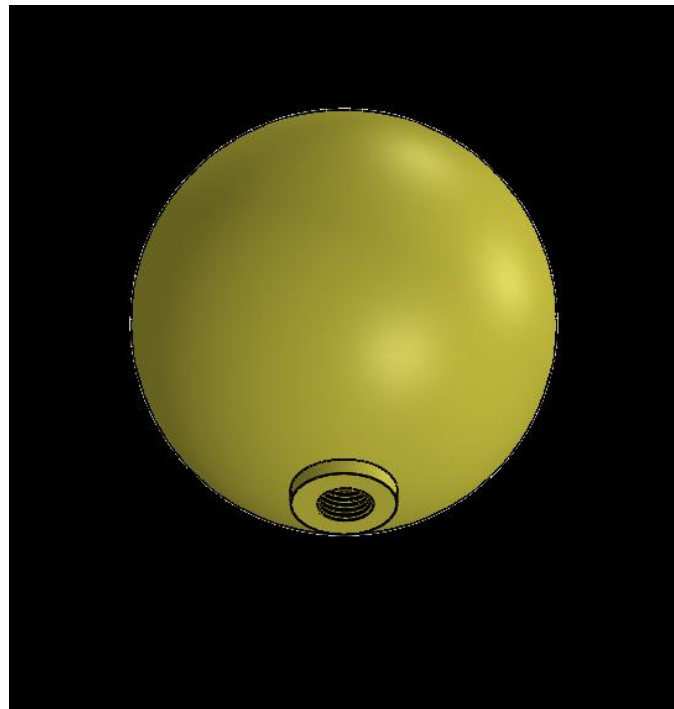


Figura C-3. Esfera



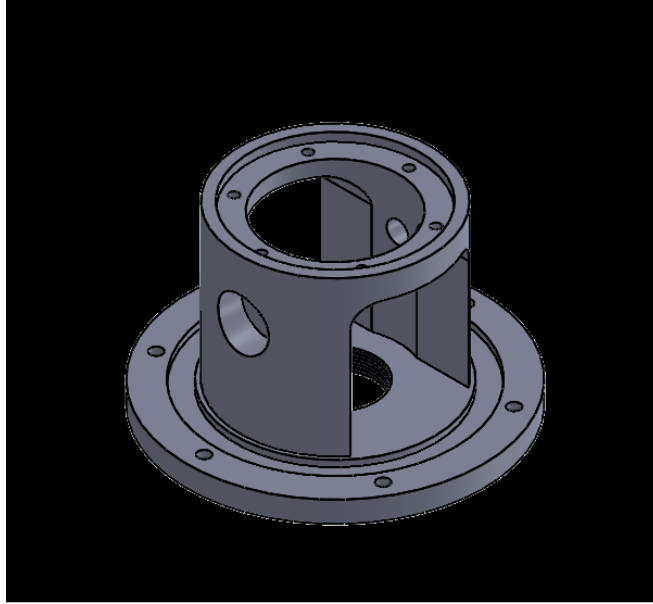


Figura C-3. Soporte



Figura C-4. Soporte

## Bibliografía

- [1] IEEE Power and Energy Society, "IEEE 100 The authoritative dictionary of IEEE standards terms.," p. 1352, 2000.
- [2] R. Arora and W. Mosch, *High voltage and electrical insulation engineering*. 2011.
- [3] International Electrotechnical Commission. and International Electrotechnical Commission. Technical Committee 42., *IEC 60060-1*. International Electrotechnical Commission, 2010.
- [4] IEEE Power and Energy Society, "IEEE Std 4 Standard for High-Voltage Testing Techniques," 2013. doi: 10.1109/IEEESTD.2013.6515981.
- [5] A. Küchler, "High Voltage Engineering Fundamentals · Technology · Applications," 2017.
- [6] IEC, "IEC 60903:2014 Live working - Electrical insulating gloves," Jul. 28, 2014. <https://webstore.iec.ch/publication/3871>
- [7] W. Hauschild and E. Lemke, "High-Voltage Test and Measuring Techniques Second Edition," 2019.
- [8] D. Kind and H. Kärner, "High voltage insulation technology," in *European Space Agency, (Special Publication) ESA SP*, 2008, no. 661 SP. doi: 10.1007/978-3-663-14090-0.
- [9] D. Kind, *An Introduction to High-Voltage Experimental Technique*. Vieweg+Teubner Verlag, 1978. doi: 10.1007/978-3-322-91763-8.
- [10] H. Cavallius, "High voltage laboratory planning," 1986.
- [11] W. Hauschild and E. Lemke, "High-Voltage Test and Measuring Techniques Second Edition."
- [12] IEC, "IEC 60071-2:2018 | IEC Webstore," Mar. 16, 2018. <https://webstore.iec.ch/publication/27072>
- [13] D. Bedoya, "Diseño y construcción de un espinterómetro para alta tensión - impulso tipo rayo," 2004.

- [14] J. Klüss and W. Larzelere, "Reconfiguration of 3 MV Marx Generator into a Modern High Efficiency System," *Proceedings of the Nordic Insulation Symposium*, no. 25, Oct. 2017, doi: 10.5324/NORDIS.V0I25.2372.
- [15] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, *High voltage engineering : fundamentals*. Butterworth-Heinemann/Newnes, 2000.
- [16] C. Ungureanu and L. M. Nemțoi, "Peak Voltage Measurements Using Standard Sphere Gap Method," *Advances in Electrical Engineering*, vol. 2014, pp. 1–5, Oct. 2014, doi: 10.1155/2014/980913.
- [17] Z. Qiu and J. Ruan, "Electric Field Features and Its Application for Air Gap Breakdown Voltage Prediction," in *Electric Field*, InTech, 2018. doi: 10.5772/intechopen.72230.
- [18] J. González, "Diseño de un explosor de esferas para aplicaciones de alta tensión," 2014.
- [19] Z. Qiu, J. Ruan, and S. Shu, "Air Insulation Prediction Theory and Applications," 2019. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/4622>
- [20] M. S. Naidu and V. Kamaraju, *High voltage engineering*. McGraw-Hill, 1996.
- [21] C. Wadhwa, "High Voltage Engineering," 2007.
- [22] B. Indian Standards, "IEC 60052 Voltage measurement by means of standard air gap," 2002.
- [23] Maglaras A and Maglaras L, "Modeling and analysis of electric field distribution in air gaps, stressed by breakdown voltages," 2004.
- [24] NTPL, "NTPL India," 2016. <https://www.ntplindia.com/impulse-voltage-generator>
- [25] A. E. Cristancho Sánchez and J. Engativa Toledo, "Restauración y ensamble de un generador de impulso tipo rayo de 3200 kV para la Empresa Industrias Explorer," 2015, [Online]. Available: <http://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/2704>
- [26] P. De and S. Canivell, "Automatización de la distancia de los explosores en un generador Marx," 2015, [Online]. Available: <https://academica-e.unavarra.es/xmlui/handle/2454/19207>
- [27] W.S Test Systems, "KF Sphere Gap Technical Data," 2016. <http://wstestsystems.com/sphere-gap.html#prettyPhoto>
- [28] IEEE, "C62.82.1-2010 IEEE Standard for Insulation Coordination--Definitions, Principles, and Rules.," p. 22, Apr. 2010.