

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN “SPHERE GAP” DE MEDIA Y ALTA TENSIÓN

Alejandro Cardona Pérez

Ingeniería electromecánica

Santiago Gómez Arango

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

El nivel isoceraunico en zonas tropicales como el territorio colombiano es una situación para tener presente en la distribución de energía eléctrica. Estos fenómenos naturales generan problemas de degradación del aislamiento eléctrico en los sistemas de media y alta tensión. Por medio del diseño y la construcción de un arreglo *Sphere Gap* para la realización de pruebas de disparos de tensión controlados hasta 65.5 kV, se identifican los agentes presentes en la determinación del esfuerzo dieléctrico del montaje, de acuerdo con las características ambientales de la ciudad de Medellín. Además, se realizan las respectivas correcciones de las tablas de determinación del esfuerzo dieléctrico suministradas por la norma *IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques (2013)* respecto a las condiciones ambientales estándar. Conjuntamente, se expone la importancia de contemplar los diferentes factores ambientales presentes en una prueba, a través de cuadros comparativos que expresan la variación presentada en cada escenario donde pueda emplearse el montaje. Finalmente, se realiza una prueba de disparos controlados en DC para corroborar las limitaciones establecidas por la norma para la determinación precisa del esfuerzo dieléctrico en este tipo de pruebas.

Palabras clave: *Sphere Gap, Breakdown Voltage, Sparking Point, Rod-Rod Gap*

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

Ante todo, quiero dedicarle la realización de este trabajo a Luz Marina Pérez Sanchez; madre, sin tu apoyo y sin tu perseverancia en el transcurso de mi vida, esto no hubiera sido posible.

De la misma manera, quisiera manifestar a través de este escrito, mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que de una u otra manera hicieron posible el cumplimiento de este objetivo personal, especialmente a mi novia y a mi padre. A los demás partícipes de este proyecto, ITM, compañeros, colegas, asesor y demás, les presento excusas si en este apartado no fueron mencionados textualmente.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

kV: kilovoltios

kPa: kilopascales

$^{\circ}\text{C}$: Grados Celsius

kHz: Kilohertzios

Hz: Hertzios

μm : micrómetro

CNC: Control numérico por computadora

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

b_0 : Presión atmosférica estándar

t_0 : Temperatura estándar

h: Humedad absoluta

δ : Factor de corrección de densidad relativa del aire

k: Factor de corrección de humedad

ρ : Densidad del aire

g: Gravedad

m.s.n.m.: Metros sobre el nivel del mar

ITM: Instituto Tecnológico Metropolitano

S: Espacio de chispa

U_{50} : 50% de probabilidades de esfuerzo dieléctrico

AC: Corriente alterna

DC: Corriente directa

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	8
1.1.	Generalidades	8
1.2.	Objetivo general	8
1.3.	Objetivos específicos	8
1.4.	Descripción del trabajo	9
2.	MARCO TEÓRICO	10
2.1.	Estado del arte <i>Sphere Gap</i>	10
2.1.	Definiciones	12
3.	METODOLOGÍA.....	14
3.1.	Diseño y construcción	14
3.2.	Factores de corrección.....	19
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	23
5.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	26
	REFERENCIAS	28
	APÉNDICE A.....	30
	PLANO CONSTRUCTIVO DE BASE ENSAMBLE	30
	APÉNDICE B.....	31
	PLANO CONSTRUCTIVO DEL EJE ESFERA	31
	APÉNDICE C.....	32
	PLANO CONSTRUCTIVO DE SOPORTES Y ESFERAS	32

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Arreglo <i>Sphere Gap</i> horizontal	14
<i>Figura 2.</i> Electrodo <i>Sphere Gap</i> de 5 cm de diámetro	15
<i>Figura 3.</i> Eje <i>Sphere Gap</i>	16
<i>Figura 4.</i> Soporte rectangular móvil en madera tipo Roble.....	16
<i>Figura 5.</i> Isométrico de ensamble <i>Sphere Gap</i> horizontal	17
<i>Figura 6.</i> Esfera y eje ensamblados	17
<i>Figura 7.</i> Base y soporte fijo ensamblados.....	18
<i>Figura 8.</i> <i>Sphere Gap</i> ensamblado.....	19
<i>Figura 9.</i> Disrupción eléctrica en <i>Spark Gap</i>	24

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: <i>Esfuerzo dieléctrico para un Sphere Gap de 5 cm de diámetro</i>	20
Tabla 2: <i>Esfuerzo dieléctrico norma IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques (2013) vs Esfuerzo dieléctrico teórico para la ciudad de Medellín vs Esfuerzo dieléctrico prueba de disparos controlados en DC - Sphere Gap de 5 cm de diámetro</i>	24
Tabla 3: <i>Comparativo de ciudades principales de Colombia</i>	25

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

Este trabajo busca exponer la importancia del esfuerzo dieléctrico en media y alta tensión a través del arreglo conocido como *Sphere Gap*, ya que este dispositivo es usado para determinar el valor pico en media y alta tensión, y ha sido a su vez adoptado por la IEEE como un instrumento confiable de calibración. La construcción del arreglo determina el esfuerzo dieléctrico máximo posible de acuerdo con el tamaño de los electrodos, la distancia entre éstos y las condiciones ambientales a las cuales se realice la prueba. En consecuencia, se diseña un *Sphere Gap* para la realización de pruebas de disparos de tensión controlados hasta 65.5 Kv. Sin embargo, con el factor densidad del aire establecido en la norma *IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques* (2013), el esfuerzo dieléctrico estaría sujeto hasta los 54.kV. Finalmente, mediante la realización de una prueba de disparos controlados en DC se comprueba la deficiencia del arreglo *Sphere Gap* en este tipo de pruebas, ya que se genera un comportamiento errático debido a la reducción del rango de humedad admisible en el arreglo.

1.2. Objetivo general

Diseñar y construir un arreglo *Sphere Gap* para la determinación del esfuerzo dieléctrico del aire a través de la realización de disparos controlados hasta 60 kV.

1.3. Objetivos específicos

-Realizar las correcciones teóricas de densidad relativa del aire en relación con la temperatura y la presión estándar ($t_0= 20^{\circ}\text{C}$, $b_0=101.3\text{kPa}$) establecida en la norma *IEEE*

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Standard for High-Voltage Testing Techniques (2013) para una prueba de disparos de tensión controlada en la ciudad de Medellín.

-Identificar la incidencia de las condiciones ambientales (temperatura, humedad, presión atmosférica, densidad dieléctrica y demás) para la determinación del esfuerzo dieléctrico del montaje *Sphere Gap*.

-Realización de prueba de disparos controlados en DC para posterior validación de reducción notable en el esfuerzo dieléctrico del arreglo *Sphere Gap* comparado con una prueba de disparos controlados en AC, impulso de rayo o impulso por conmutación.

1.4. Descripción del trabajo

En el capítulo 1 se busca captar la atención del lector a través de las generalidades, claves y limitaciones del arreglo *Sphere Gap*. Además, se enuncian los diferentes objetivos propuestos y desarrollados en el cuerpo del trabajo. El capítulo 2 expone de forma cronológica el estado del arte del arreglo *Sphere Gap*, desde sus inicios hasta lo más actual o reciente de este dispositivo.

El capítulo 3 comprende el método desarrollado, el cómo y el porqué del diseño del arreglo *Sphere Gap*, recursos, herramientas y materiales que fueron utilizados en la construcción del montaje. Además, en este capítulo se determina el factor de corrección de densidad relativa del aire δ de acuerdo con las condiciones ambientales de la ciudad de Medellín para la realización de pruebas de disparos controlados en AC, impulso de rayo e impulso por conmutación.

Finalmente, en el capítulo 4 se presentan los principales resultados del diseño y construcción del arreglo *Sphere Gap*, con énfasis en la inexactitud del esfuerzo dieléctrico durante una prueba de disparos controlados en DC, y la influencia de las condiciones ambientales del lugar de la prueba para la determinación del mismo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Estado del arte *Sphere Gap*

Desde comienzos del siglo XX la medición de media y alta tensión fue desarrollada a través del método de espacio de chispa, en inglés *Spark Gap*. Inicialmente se utilizaba un arreglo entre agujas de costura soportadas axialmente para la generación de chispa entre ellas llamado *Needle Point Spark Gap*. En este arreglo las agujas debían tener al menos dos veces la longitud de la brecha en la cual iban a ser dispuestas, estas condiciones hacían el montaje robusto y de gran tamaño, además de que teóricamente el montaje estaba establecido para tensiones no mayores a 100 kV, ya que a tensiones superiores los resultados no lograban ser confiables. A partir de este punto las limitaciones presentadas por el montaje *Needle Point Spark Gap* hacían prever la implementación de un arreglo portable, compacto, confiable y más conveniente a comparación del arreglo del momento. Es aquí donde el montaje conocido como *Sphere Gap* comenzaría a reemplazar al montaje *Needle Point Spark Gap* (Farnsworth & Fortescue, 1913). *Sphere Gap*, en español brecha entre esferas, es un arreglo entre dos electrodos esféricos de conductor eléctrico (comúnmente Aluminio) ubicados a una determinada distancia de aislante eléctrico (generalmente aire), donde los electrodos al ser sometidos a una tensión umbral generan el conocido *Breakdown Voltage* (Esfuerzo dieléctrico), en el cual las condiciones del aislante instituido son rotas para la conducción de corriente a través de él. En otras palabras, se puede considerar el arreglo *Sphere Gap* al igual que los arreglos preliminares a éste, como arreglos de interruptores de cierre para una determinada tensión, en los cuales influye la distancia entre electrodos, la temperatura, la presión atmosférica, la geometría de los electrodos y demás. El arreglo de *Sphere Gap* además de las ventajas de tamaño, confiabilidad y conveniencia anteriormente enunciadas, tiene la ventaja de estar libre de complicadas correcciones en relación con las condiciones ambientales en las cuales se realice la prueba. Esta característica hace viable la construcción de curvas de medidas estándar para diferentes tamaños de electrodos en

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

cualquier altitud, abarcando los diferentes ambientes a los cuales pueda ser sometido el arreglo (Peek, 1914).

Adicional a la incidencia de las condiciones ambientales en el arreglo *Sphere Gap*, se descubrió la influencia de la frecuencia en el arreglo. A través de la implementación de un arreglo en el cual uno de los electrodos está aislado y el otro está puesto a tierra, se evidenció la relación entre la frecuencia y el esfuerzo dieléctrico del aire al momento de aumentar la frecuencia al orden de 200 a 1000 kHz, reflejando una reducción del 15% en el esfuerzo dieléctrico del aire en la frecuencia más alta, comparado con los 50 Hz convencionales (W. E. Seward, 1938).

En este punto ya se habían identificado diferentes factores que intervenían en la medición en media y alta tensión, para lo cual era necesario una normativa estándar que estableciera las condiciones a las cuales se debía realizar la prueba.

En 1982 y luego de cuatro años para su aprobación, la IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) creó una técnica estándar para las pruebas en alta tensión, entre ellas un capítulo especial para el arreglo *Sphere Gap*. Se establecieron métodos para la medida del valor pico en: voltaje alterno, voltaje directo, voltaje de impulso de rayo y voltaje de impulso por conmutación. En esta sección se buscó describir la geometría estándar de las esferas, bosquejar el esquema de conexión del montaje y suministrar tablas estándar para el esfuerzo dieléctrico, incluyendo la influencia de los factores descritos anteriormente. Respecto a la geometría de los electrodos, las esferas deben tener una superficie suave, lisa y la curvatura debe ser lo más uniforme posible. El diámetro de estos electrodos no debe variar en más del 2 % del diámetro de diseño (ANSI/IEEE, 1978). En el ámbito de la construcción del arreglo se implementaron dos tipos, un arreglo de eje vertical con la esfera más baja aterrizada a tierra y un arreglo de eje horizontal con ambas esferas conectadas a la fuente de voltaje o una de ellas aterrizada a tierra. En la configuración horizontal generalmente las esferas están simétricamente a alto voltaje sobre el nivel del suelo y ambas tienen idéntico tamaño y forma (Valavala & Kanchanpalli, 2013).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

A medida que pasan los años toda normatividad pierde vigencia debido principalmente a sugerencias y comentarios de estudiosos del tema, los cuales buscan evidenciar vacíos encontrados y posibles mejoras en lo establecido anteriormente. Por tal motivo la técnica *IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques* establecida en el año 1978 tuvo dos actualizaciones, una en el año 1995 y otra en el año 2013, siendo esta última la actualmente vigente. En esta última versión se hicieron ciertas modificaciones en las cuales se destaca la adición de diámetros estándar a los determinados en versiones anteriores, llegando a esferas con diámetros de hasta dos centímetros. Además, cabe recalcar la delimitación de la aspereza máxima de las esferas, la cual debe ser menor a 10 μm , entre otros cambios y modificaciones en búsqueda de una mayor exactitud en la prueba, evitando el efecto corona presentado en ésta (IEEE Power and Energy Society, 2013)

Actualmente el arreglo *Sphere Gap* es usado en equipos de energía eléctrica para la medida de valores pico en alta tensión, y ha sido adoptado en múltiples diseños como dispositivo de calibración de acuerdo con lo establecido por la IEC y la IEEE (K. Jaghannath, 2011).

2.1. Definiciones

Sphere Gap: Arreglo de dos electrodos esféricos para la determinación del esfuerzo dieléctrico del aire a determinadas condiciones ambientales.

Electrodo: Conductor eléctrico utilizado como terminal de referencia en montajes eléctricos.

Sparking Point: Ubicación espacial de los electrodos en la cual se encuentra la distancia más corta entre ambos (S). A su vez, es el punto en el cual se genera la chispa al romperse el esfuerzo dieléctrico del montaje.

Spark Gap: Distancia entre electrodos generalmente conocida como espacio para generación de chispa.

Esfuerzo dieléctrico: Valor límite de intensidad del campo eléctrico en el cual un material dieléctrico pierde sus propiedades y pasa a ser un material conductor.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Densidad relativa: Comparación entre la densidad de una sustancia con relación a la densidad de otra sustancia de referencia.

Impulso de rayo: Tensión o corriente transitoria generada por una descarga atmosférica.

Efecto corona: Fenómeno eléctrico producido por la ionización del fluido aislante entre conductores. Se caracteriza por su color luminoso y un sonido estrepitoso al momento de su generación.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Voltage Testing Techniques (2013), de modo que el diámetro del electrodo definido para un arreglo *Sphere Gap* funcional entre 8 y 65.5 kV es de 5 cm.

Las cotas restrictivas establecidas son una guía y están sujetas al diámetro de las esferas (ver Figura 1). Partiendo de esta premisa el diseño del montaje se dividió en cinco piezas: Esferas, ejes, soporte fijo, soporte móvil y base del montaje.

El diseño de las piezas se realizó en el programa Autodesk Inventor para el posterior desarrollo de los planos constructivos. Luego de tener los planos constructivos de las cinco piezas, se procede con la fabricación de cada una de ellas.

Las esferas y los ejes fueron desarrollados en un centro de mecanizado CNC referencia LEADWELL V-40iT, el cual garantiza una variación no mayor al 2% en el diámetro de los electrodos y una aspereza no mayor a los 10 μm establecidos en la norma debido a su alto poder de precisión.



Figura 2. Electrodo *Sphere Gap* de 5 cm de diámetro.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 3. Eje Sphere Gap.

Con respecto a los soportes del eje, la altura restrictiva demarcada con la letra A (ver Figura 1), determina la altura desde el *sparking point* hasta la base del arreglo y está establecida de acuerdo con la Tabla 11 de la norma *IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques* (2013). Para una esfera con diámetro de 5 cm, el valor de A está determinado entre siete y nueve veces el diámetro de la esfera, en este caso se diseñó a una altura de 35 cm.



Figura 4. Soporte rectangular móvil en madera tipo Roble.

La base de igual modo que los soportes fueron fabricados en madera tipo Roble, principalmente por ser un material resistente a la fricción generada en la guía de desplazamiento entre el soporte móvil y la base, además de proporcionar una densidad propicia que le permite al montaje una estabilidad adecuada.

A continuación, se bosqueja el isométrico de ensamble de las cinco piezas diseñadas.

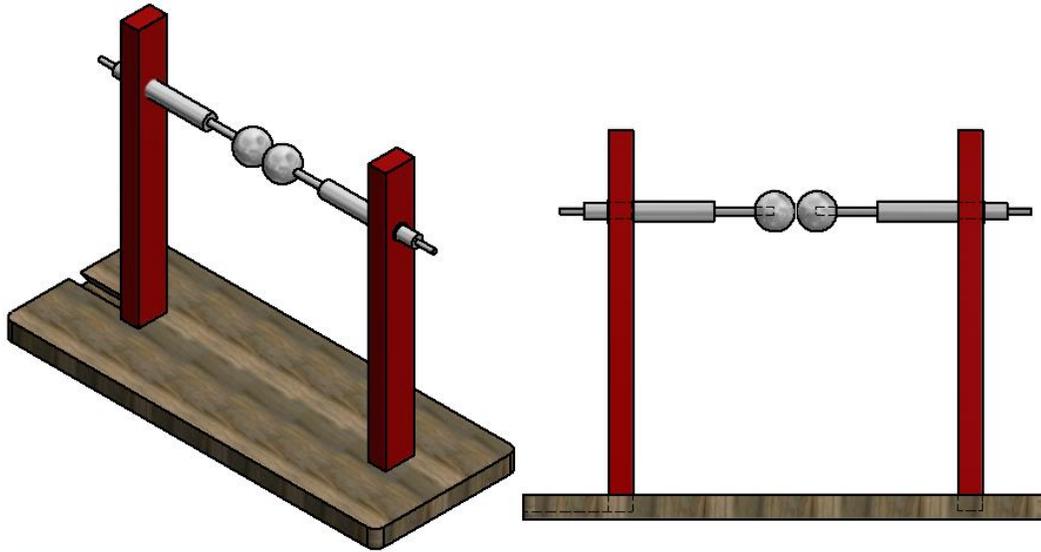


Figura 5. Isométrico de ensamble Sphere Gap.

El ensamble del montaje se resume en los siguientes pasos:

1. Las esferas y los ejes se unen a través de una rosca métrica M10 x 1.5 norma ISO DIN 13-1, esto indica un diámetro exterior de rosca de 10 mm con un paso de 1.5 mm.



Figura 6. Esfera y eje ensamblados.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. Los soportes se acoplan con sus respectivos ejes en la sección de 20 mm de diámetro. Éstos se ajustan entre el cambio de sección y un anillo de retención exterior norma DIN 471.
3. El soporte fijo se atornilla a la base de madera.



Figura 7. Base y soporte fijo ensamblados.

4. El soporte móvil se encaja en la guía de desplazamiento de la base de madera a través del ensamble tipo “Cola de milano”. El tope de la guía de desplazamiento permite que las esferas queden a la distancia mínima permitida por la norma (0.2 cm).

El resultado del ensamble de cada una de las piezas se ve reflejado en la siguiente Figura.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 8. Sphere Gap ensamblado.

Posterior al ensamble del *Sphere Gap*, se procede con la realización de pruebas de disparos controlados a través de una fuente de media tensión, la cual entrega hasta 9 kV en DC y hasta 7.5 kV en AC. (E. Zapata, J. Gutiérrez, S. Gómez, J. Valencia, 2017) (C. Benítez, S. Charry, S. Gómez, J. Valencia, 2017)

3.2. Factores de corrección

La siguiente tabla modela la relación entre el espacio de chispa y el esfuerzo dieléctrico esperado a temperatura y presión estándar ($t_0 = 20^\circ\text{C}$, $b_0 = 101.3\text{kPa}$) de acuerdo a lo establecido en la Tabla 12 de la norma *IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques* (2013) para pruebas de disparos controlados en AC, impulso de rayo e impulso por conmutación. Estos valores fueron obtenidos bajo condiciones de humedad absoluta h entre 5 y 12 $\frac{\text{g}}{\text{m}^3}$, con un promedio de 8.5 $\frac{\text{g}}{\text{m}^3}$.

Tabla 1: *Esfuerzo dieléctrico para un Sphere Gap de 5 cm de diámetro*

Espacio entre esferas en cm (S)	Esfuerzo dieléctrico en kV
0.20	8.0
0.26	9.6
0.30	11.2
0.40	14.3
0.50	17.4
0.60	20.4
0.70	23.4
0.80	26.3
0.90	29.2
1.0	32.0
1.2	37.6
1.4	42.9
1.5	45.5
1.6	48.1
1.8	53.0
2.0	57.5
2.2	61.5
2.4	65.5

No obstante, el objetivo no era desarrollar un arreglo *Sphere Gap* a temperatura y presión estándar, sino desarrollarlo a la temperatura y la presión atmosférica en la ciudad de Medellín. Por tal motivo es necesario multiplicar los valores teóricos del esfuerzo dieléctrico por ciertos factores de corrección. De acuerdo con lo establecido en la norma *IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques* (2013) existen dos factores de corrección para el esfuerzo dieléctrico: factor de corrección de densidad relativa del aire δ y factor de corrección de humedad k . El factor de corrección de densidad relativa del aire δ está determinado por la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{b}{b_0} * \frac{(273 + t_0)}{(273 + t)} \quad (1)$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

δ : Factor de corrección de densidad relativa del aire

b : Presión atmosférica ciudad de Medellín

t : Temperatura promedio anual ciudad de Medellín

b_0 : Presión atmosférica estándar

t_0 : Temperatura estándar

La presión b y b_0 deben ser expresadas en kilopascales (kPa), mientras que la temperatura t y t_0 deben estar en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

Teóricamente la presión atmosférica disminuye a medida que se aumenta la altura sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). Sin embargo, este comportamiento no es lineal, ya que la densidad del aire se reduce conforme se aumenta la altura, debido a la disminución del aire en este comportamiento. Esta situación se ve plasmada en la siguiente ecuación:

$$b = b_0 * e^{-(\tau * H)} \quad (2)$$

H : Altura sobre el nivel del mar de Medellín

τ : Constante atmosférica

b : Presión atmosférica ciudad de Medellín

b_0 : Presión atmosférica estándar

Donde la constante τ está determinada por:

$$\tau = \frac{\rho * g}{b_0} \quad (3)$$

ρ : Densidad del aire a presión atmosférica estándar

g : Gravedad de la tierra

b_0 : Presión atmosférica estándar

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En donde la densidad del aire ρ a presión atmosférica estándar es igual a $1.225 \frac{kg}{m^3}$ y la gravedad de la tierra g es igual a $9.8 \frac{m}{s^2}$. Insertando estos valores y la presión atmosférica estándar b_0 en pascales (Pa) en la Ecuación 3, se tiene que la constante atmosférica τ es igual a $1.18 \times 10^{-4} m^{-1}$. Introduciendo el valor de la constante atmosférica τ , la altura sobre el nivel del mar de Medellín H (1495 m) y la presión atmosférica estándar b_0 expresada en kilopascales (kPa) en la Ecuación 2, se tiene que la presión atmosférica teórica en la ciudad de Medellín b es igual a 85 kPa.

Con una temperatura anual promedio en la ciudad de Medellín t igual a $22^\circ C$ y los demás componentes de la Ecuación 1 se tiene que el factor de corrección de densidad relativa del aire δ es igual a 0.83.

En el caso del factor de corrección de humedad k , la ecuación está dada por:

$$k = 1 + \left[0.002 \left(\frac{h}{\delta} - 8.5 \right) \right] \quad (4)$$

k : Factor de corrección de humedad

h : Humedad absoluta

δ : Factor de corrección de densidad relativa del aire

Donde h es la humedad absoluta del lugar donde se realice la prueba. La humedad absoluta está determinada por la cantidad de masa de vapor de agua en un determinado volumen de aire ambiente, lo cual está sujeto a las condiciones ambientales del sistema en tiempo real. Por tal motivo se omite la realización del cálculo del factor de corrección de humedad k , ya que es necesario tener el valor en tiempo real de la humedad absoluta del lugar.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Inicialmente se había determinado que el arreglo sería funcional entre 8 y 65.5kV de acuerdo a lo establecido en la norma, pero luego de realizar la corrección de densidad del aire δ se calculó un rango de aplicación del montaje entre 6.6 y 54.4kV. En la siguiente tabla se muestra un comparativo entre los valores suministrados por la norma *IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques* (2013) para pruebas de disparos controlados en AC, impulso de rayo e impulso por conmutación, los resultados teóricos corregidos para la ciudad de Medellín y los valores obtenidos en la prueba de disparos controlados en DC realizada en el laboratorio de Máquinas Eléctricas del Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM).

Tabla 2: *Esfuerzo dieléctrico norma IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques (2013) vs Esfuerzo dieléctrico teórico para la ciudad de Medellín vs Esfuerzo dieléctrico prueba de disparos controlados en DC- Sphere Gap de 5 cm de diámetro*

Espacio entre esferas en <i>cm</i> (<i>S</i>)	Esfuerzo dieléctrico norma <i>IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques</i> (2013) en <i>kV</i>	Esfuerzo dieléctrico teórico corregido para la ciudad de Medellín en <i>kV</i>	Esfuerzo dieléctrico prueba de disparos controlados en DC
0.20	8.0	6.6	2.3
0.26	9.6	8.0	3.7
0.30	11.2	9.3	X
0.40	14.3	11.9	X
0.50	17.4	14.4	X
0.60	20.4	17.0	X
0.70	23.4	19.4	X
0.80	26.3	21.8	X
0.90	29.2	24.2	X
1.0	32.0	26.6	X
1.2	37.6	31.2	X

Espacio entre esferas en <i>cm</i> (S)	Esfuerzo dieléctrico norma <i>IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques</i> (2013) en <i>kV</i>	Esfuerzo dieléctrico corregido para la ciudad de Medellín en <i>kV</i>	Esfuerzo dieléctrico prueba de disparos controlados en DC
1.4	42.9	35.6	X
1.5	45.5	37.8	X
1.6	48.1	40.0	X
1.8	53.0	44.0	X
2.0	57.5	47.7	X
2.2	61.5	51.0	X
2.4	65.5	54.4	X

Cabe resaltar que durante la prueba se evidenció una disrupción eléctrica continua en el *Spark Gap*. El propósito del *Sphere Gap* es generar disparos controlados con una determinada frecuencia, lo cual no se alcanzó principalmente por defectos de limitación del condensador de la fuente o por una ionización anticipada del aire a razón del impulso de corriente continua.

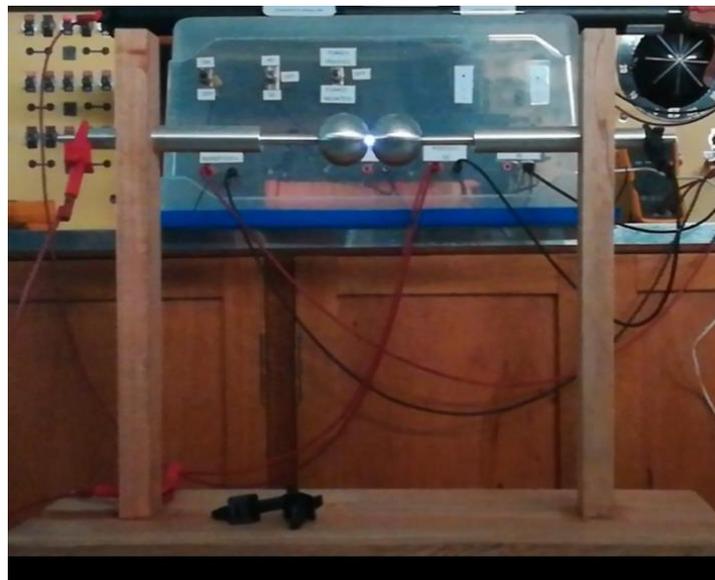


Figura 9. Disrupción eléctrica en Spark Gap

En el ámbito del factor de corrección de densidad relativa del aire δ , se generó una reducción porcentual en el esfuerzo dieléctrico establecido inicialmente por la norma. Para

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

comprender la influencia de las condiciones ambientales en el arreglo *Sphere Gap*, basta con obtener datos teóricos de diferentes escenarios en los cuales podría ser realizada la prueba. Teniendo presente los principales agentes en la determinación del factor de corrección de densidad relativa del aire δ , en la Tabla 3 se establece un cuadro comparativo entre las principales ciudades de Colombia.

Tabla 3: *Comparativo de ciudades principales de Colombia*

	Bogotá	Medellín	Cali	Cartagena
Presión atmosférica (kPa)	74.22	84.85	89.79	101.28
m.s.n.m.	2625	1495	1018	2
Temperatura promedio (°C)	14	22	24	29
Factor de corrección de densidad relativa del aire δ	0.75	0.83	0.87	0.97
Esfuerzo dieléctrico teórico máximo para <i>Sphere Gap</i> de 5 cm de diámetro (kV)	49.13	54.4	57	63.53

De la Tabla 3 se puede inferir que, a menor presión atmosférica, menor será el factor de corrección de densidad relativa del aire δ , por consiguiente, el esfuerzo dieléctrico se verá reducido. En virtud de ello, y partiendo de la teoría que, a menor presión atmosférica, menor cantidad de moléculas de aire en el ambiente, el esfuerzo dieléctrico se producirá a una menor tensión en aquellos lugares donde la escasez de aire sea una constante.

Sin embargo, además de la influencia de la presión atmosférica en el esfuerzo dieléctrico, la humedad en el ambiente cumple un papel fundamental, ya que al momento del aislante entrar en contacto con la humedad (moléculas de agua), la conducción de corriente por el aislante se ve favorecida, gracias a las propiedades del agua como conductor eléctrico. Por tal motivo, para una mayor precisión en los resultados se recomienda la utilización de equipos de medida (barómetros, medidores de temperatura, medidores de humedad relativa, etc.) los cuales establezcan la presión atmosférica, la temperatura y la humedad relativa real del sitio donde vaya a realizarse la prueba.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

- Las condiciones ambientales a las cuales se realice la prueba influyen rotundamente en los resultados finales de ésta. Por ejemplo, a medida que se aumente la presión atmosférica, el máximo esfuerzo dieléctrico del montaje aumenta debido a la abundancia de moléculas de aire en el ambiente. Adicional a la influencia de la presión atmosférica en el arreglo *Sphere Gap*, la humedad en el ambiente es fundamental a la hora de determinar el esfuerzo dieléctrico del aire. En aras de obtener resultados similares a los establecidos en la norma *IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques* (2013), es recomendable generar un ambiente controlado que garantice los $8.5 \frac{g}{m^3}$ de humedad absoluta promedio h establecidos en la norma. En caso de no poder generar un ambiente controlado, se recomienda utilizar elementos de medición de humedad relativa que suministren valores en tiempo real del espacio en donde vaya a ser realizada la prueba, para el posterior cálculo del factor de corrección de humedad k .
- La notable diferencia entre valor obtenido en la prueba de disparos controlados en DC y los resultados teóricos pre y post corrección para pruebas de disparos controlados en AC, impulso de rayo e impulso por conmutación. Esta incompatibilidad de resultados valida la recomendación establecida en la norma *IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques* (2013) acerca del no uso del arreglo *Sphere Gap* para pruebas de disparos controlados en DC, debido al comportamiento errático del arreglo a razón de las partículas en el aire, las cuales generan una reducción del esfuerzo dieléctrico en este tipo de pruebas. En su lugar, la norma recomienda un arreglo *Rod-Rod Gap*, el cual garantiza un rango de humedad más alto al proporcionado por el arreglo *Sphere Gap*.
- Se recomienda la realización de pruebas de disparos controlados en AC, impulso de rayo o impulso por conmutación en el arreglo *Sphere Gap* a través del método “Up and Down”

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

para la determinación del valor U_{50} durante la prueba, todo esto con el fin de tener un resultado exacto en esfuerzo dieléctrico obtenido.

- Se sugiere la creación de un sistema de control mecánico, con el cual se pueda configurar el montaje para un esfuerzo dieléctrico determinado.
- Esta investigación podría extenderse al análisis del esfuerzo dieléctrico en otros medios aislantes tales como el vacío, ya que es ampliamente utilizado en dispositivos de seccionamiento en media y alta tensión.
- Para mayor precisión en los resultados teóricos alcanzados, se recomienda la utilización de equipos de medición tales como barómetros, medidores de temperatura, medidores de humedad relativa y demás, los cuales provean valores en tiempo real del espacio donde se tenga establecido realizarse la prueba.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

- ANSI/IEEE. (1978). *IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing. ANSI/IEEE Std 4-1978.*
- BIN HAMZAH, A. A. (2015). EFFECT OF FIELD UTILIZATION FACTOR ON AIR BREAKDOWN LEVEL UNDER LIGHTNING IMPULSE, (January). Retrieved from http://eprints.uthm.edu.my/7794/1/NOOR_AIN_BINTI_YUSOFF.pdf
- Binti Rosdi, H. (2014). *AIR BREAKDOWN CHARACTERISTICS IN PLANE-PLANE AND SPHERE GAP ELECTRODE CONFIGURATION UNDER LIGHTNING IMPULSE.* Universiti Tun Hussein Onn Malaysia.
- C. Benítez, S. Charry, S. Gómez, J. Valencia, I. (2017). Design and construction of a medium voltage source.
- Chakraborty, S., Patil, R., & Y.B. Mandake. (2018). STUDY OF BREAKDOWN PHENOMENON IN SOLID INSULATORS USING SPHERE GAP AND INSULATION TESTING KITS. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2759–2761.
- E. Zapata, J. Gutiérrez, S. Gómez, J. Valencia, I. (2017). Design and Construction of a Measurement Probe for Medium Voltage Ac.
- Farnsworth, W., & Fortescue, C. (1913). The Sphere Spark Gap. In *Standards Committee* (pp. 299–305).
- Gómez Arango, S. (2015). Diseño y construcción de un generador de impulsos de alta tensión, portátil y didáctico. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/50618/>
- IEEE Power and Energy Society. (2013). *IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques* (Vol. 13).
- K. Jaghannath. (2011). Measurement of Air Breakdown Voltage and Electric Field Using Standard Sphere Gap Method. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research*, (10), 5–16.
- Peek, F. W. (1914). The Sphere Gap as a Means of Measuring High Voltage. In *Transactions*

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

of the American Institute of Electrical Engineers (Vol. XXXIII, pp. 923–949).

<https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1914.4765166>

Pen-Tung, A. (1927). Studies on Sparking in Air. *A.I.E.E.*, 46, 604–615.

<https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1927.5061398>

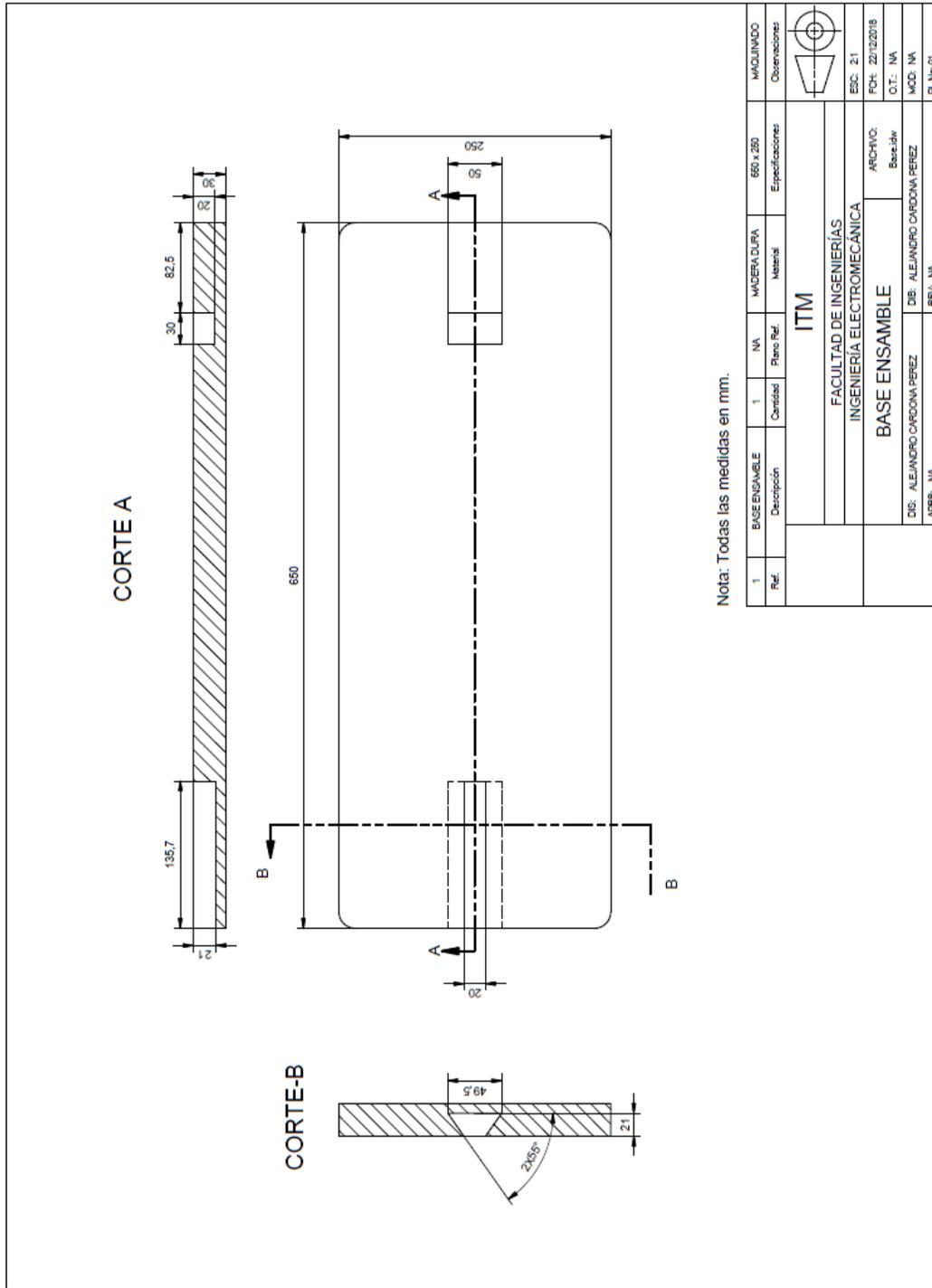
Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. (1914). DISCUSSION ON " THE SPHERE GAP AS A MEANS OF MEASURING HIGH VOLTAGE " (PEEK), " THE ELECTRIC STRENGTH OF AIR—V, THE INFLUENCE OF FREQUENCY " (WHITEHEAD AND GORTON), AND " SPHERE GAP DISCHARGE VOLTAGES AT HIGH FREQUENCIES " (CLARK AND RYAN). In *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers* (pp. 103–124).

Valavala, M., & Kanchanpalli, B. (2013). Measurement of Air Breakdown Voltage Using Standard Sphere Gap. *Journal of Electrical Engineering*, 1–6.

W. E. Seward. (1938). The electric strength of air at high frequencies.

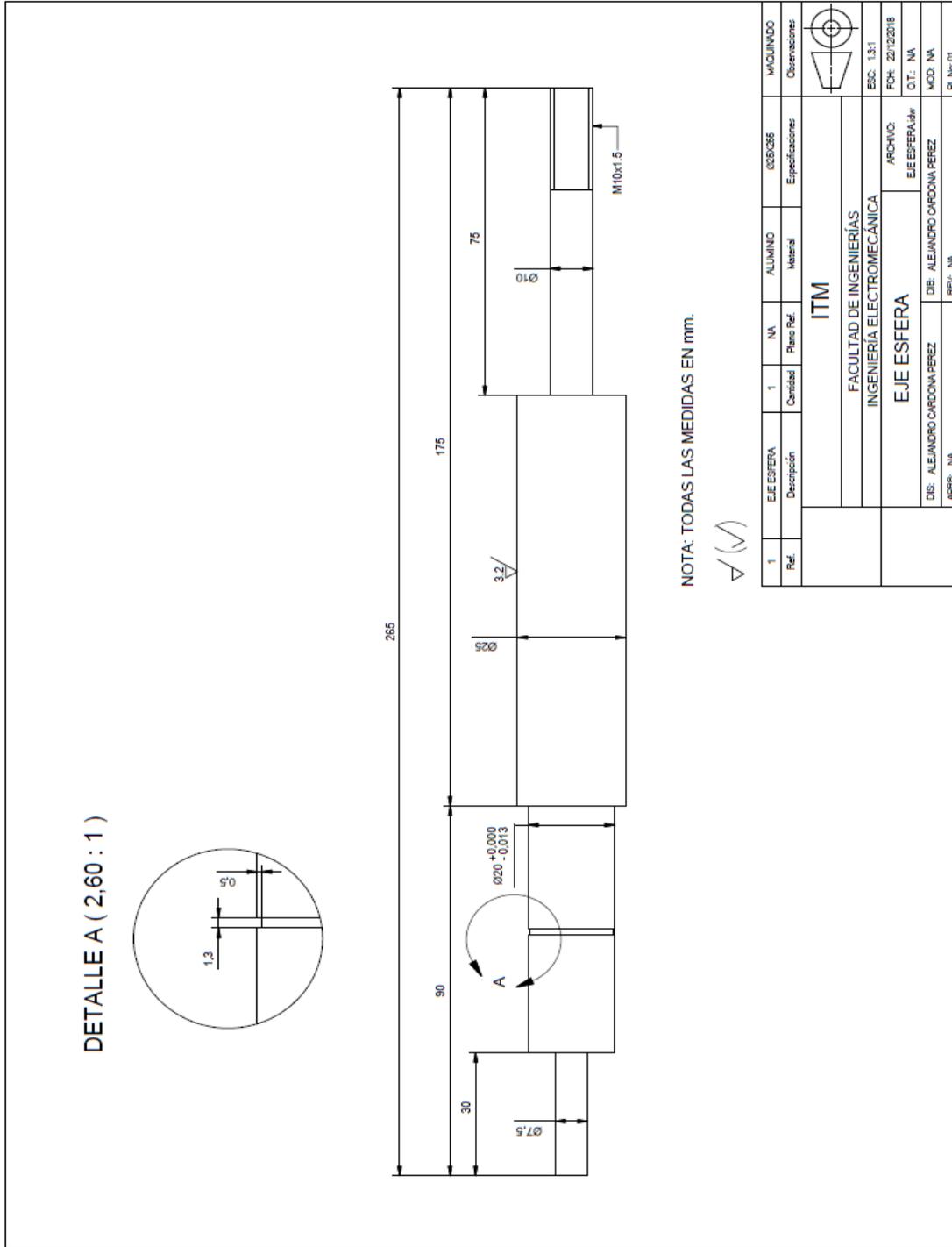
APÉNDICE A

PLANO CONSTRUCTIVO DE BASE ENSAMBLE



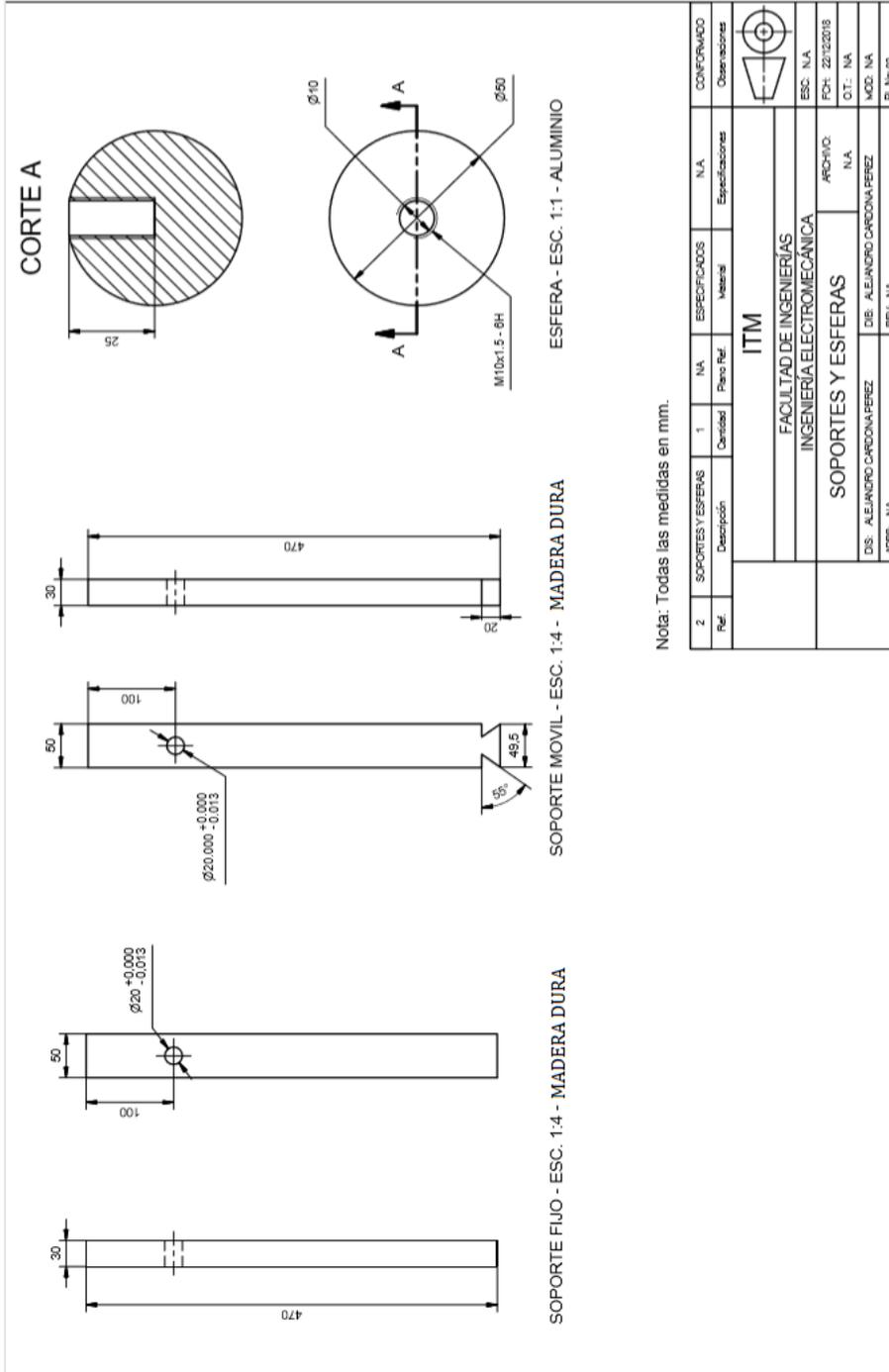
APÉNDICE B

PLANO CONSTRUCTIVO DEL EJE ESFERA



APÉNDICE C

PLANO CONSTRUCTIVO DE SOPORTES Y ESFERAS



Nota: Todas las medidas en mm.

Ref.	Descripción	Cantidad	MA	ESPECIFICADOS	N.A.	CONFORMADO
2	SOPORTES Y ESFERAS	1	MA	Material	Especificaciones	Observaciones
	ITM FACULTAD DE INGENIERÍAS INGENIERIA ELECTROMECÁNICA SOPORTES Y ESFERAS					
	ESC. N.A. FCH: 22/12/2015 ARCHIVO: N.A. OT: N.A. MOD: N.A. DISEÑADOR: ALEJANDRO CARDONA-PÉREZ REVISOR: N.A. PL. No 02					

