

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE UN
GENERADOR DE CAMPO ELECTROSTÁTICO EN UN BANCO
DE PRUEBAS DEL CAMPO ESCUELA COLORADO**



**Marco Andrés Arias Torres
Byron Daniel Campo Zúñiga**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2014

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE UN GENERADOR DE CAMPO ELECTROSTÁTICO EN UN BANCO DE PRUEBAS DEL CAMPO ESCUELA COLORADO



Marco Andrés Arias Torres
Byron Daniel Campo Zúñiga

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director

Dr. Hermann Raúl Vargas Torres

Codirectores

M.Sc. Emiliano Ariza León

M.Sc. Cristian Camilo Jiménez

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2014

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a:

A los ingenieros Hermann Vargas (Ph.D.), Emiliano Ariza (M.Sc.) y Cristian Jiménez (M.Sc.) por su tiempo, conocimiento e invaluable colaboración en el desarrollo de este proyecto.

A los ingenieros Julio Cesar Chacón (M.Sc.), Raul Omar Vila (M.Sc.) y Ernesto Aguilera (Ph.D.) por su interés, aportes, correcciones, comentarios y puntos de vista, y por propender por la excelencia de este proyecto.

Al equipo de trabajo: Ángela Ortiz, Johanna Almeyda, Sergio Riberos, Andrés Ramírez, John Rey, Jerson Pinzón, José Suárez y Andrés Hernández.

Al Lic. Abelardo Rueda y a la Sec. Ingrid García, por su amabilidad, colaboración desinteresada y compromiso.

Al Ing. Hernando Buendía, al Ing. Edgar Sebastian Daza y al Tec. Daniel Garcia, por sus valiosos aportes profesionales.

Muy especialmente, a sus amigos. Por los buenos y los no tan buenos momentos. Por hacer del paso por la universidad, una experiencia más que académica.

DEDICATORIA

A Dios, por permitirme alcanzar un logro más en la vida.

A mis padres, Luz Marina y Marco Aurelio, porque a ellos les debo todo lo que soy y todo lo que he logrado.

A mis hermanos, Rafael Eduardo, Luz Adriana y Javier Fernando, por su constante apoyo, consejos e inspiración para salir adelante.

A mi compañero y amigo Byron, con quién compartí muchos momentos de mi vida universitaria.

A Diana, con quien compartí y aprendí la belleza y el compromiso de la relación cercana.

A mis primos, tíos y abuelos quienes desean siempre lo mejor para mí.

A la Coral UIS, por enseñarme a hacer música y porque más que una institución fue un espacio encontré buenas amistades.

A mis amigos, quienes me apoyaron en los momentos difíciles y así mismo me acompañaron en los momentos alegres.

Marco Andrés Arias Torres

... a Dios.

... a Jorge y a Febe.

Byron Daniel Campo Zúñiga

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	17
1. Criterios de diseño eléctrico.	18
2. Presentación del generador electrostático	19
3. Montaje experimental	21
4. Simulación numérica computacional	25
5. Resultados	27
6. Conclusiones	29
7. Observaciones	30
8. Recomendaciones	30
Referencias	30
Bibliografía	32
A. Datos obtenidos a partir de montaje experimental (sección 4) simulación numérica computacional (sección 5) para cada d_j.	34
B. Obtención de E_i y ε_i.	62
C. Diseño, evolución y construcción del prototipo de la herramienta electrostática.	64
C.1. Ideas iniciales.	64
C.2. Requerimientos básicos.	64
C.3. Primeras especificaciones del prototipo.	64
C.4. Primer prototipo de herramienta electrostática.	65
C.5. Complicaciones con el diseño del primer prototipo.	65
C.6. Especificaciones importantes y definitivas para el prototipo.	66
C.7. Prototipo final de la herramienta de campo electrostático	66
C.8. Construcción del prototipo de la herramienta electrostática	67
C.8.1. Fabricante	67
C.8.2. Materiales	67
C.8.3. Pasos de la construcción	67
C.8.4. Prototipo construido	68
D. Diseño y construcción de placas de laboratorio: Réplicas de Placas Metálicas del Prototipo de la Herramienta Electroestática	69
D.1. Medidas y dimensiones	69
D.2. Material	69
D.3. Construcción de las réplicas	69

LISTA DE FIGURAS

0.1. Banco de Pruebas. FUENTE: [17].	18
1.1. Placas planas paralelas. FUENTE: [19], p 817.	18
2.1. Herramienta Eléctrica. FUENTE: Los autores.	20
2.2. Fuente de Alta Tensión Leybold 521 70. FUENTE: [23].	21
3.1. Montaje <i>Leybold - balanza de tensión de Kirchoff P3.1.4.2.</i> para medición de la fuerza entre placas cargadas. a: Placa superior exterior. b: Placas superior interior. c: Placa inferior. d: Perilla de sujeción placa inferior. e: Perilla de fijación placa inferior. f: Perilla de nivelación. FUENTE: [25].	22
3.2. Placas Réplica adaptadas al montaje de la figura 3.1. FUENTE: Los autores.	23
3.3. Adaptación del montaje <i>Balanza de Tensión de Kirchoff Leybold P3.1.4.2.</i> con placas réplica. FUENTE: Los autores.	23
3.4. Instrumento Universal de Medidas Físicas Leybold 531 835 y su Sensor de Fuerza Leybold 524 060 empleados para la medición de la fuerza electrostática.	24
3.5. Circuito eléctrico establecido para medición de corriente. FAT: Fuente de alta tensión. Amp: Amperímetro digital. PPP: Placas planas paralelas. FUENTE: Los autores.	24
3.6. Montaje en laboratorio para desarrollo experimental. 1: Instrumento universal de medidas físicas. 2: Cable del sensor. 3: Amortiguadores de viento. 4: Soporte universal. 5: Contenedor con crudo (placas inmersas). 6: Escala graduada de altura. 7: Cables de alimentación. 8: Fuente de alta tensión. 9: Amperímetro digital.	25
4.1. Entornos del software de simulación FEMM v4.2. con el gráfico de la herramienta en corte longitudinal. Placas separadas a una distancia $d = 8\text{ mm}$ y una diferencia de potencial entre ellas de $U = 4\text{ kV}$. FUENTE: Los autores.	26
5.1. Generador electrostático construido. FUENTE: Los autores.	28
5.2. Errores promedio de los métodos (simulación y experimental) para cada d_j . FUENTE: Los autores.	29
A.1. Gráfica de las magnitudes de campo electrostático E_i , E_{sim_i} y E_{exp_i} , vs diferencia de potencial U_i para $d = 0,5\text{ mm}$: $E_i = E_i$; $E_{sim_i} = E_{sim_i}$; $E_{exp_i} = E_{exp_i}$	34
A.2. Errores de simulación (e_{sim_i}) y experimentales (e_{exp_i}), vs diferencia de potencial entre placas U_i para $d = 0,5\text{ mm}$: $e_{sim_i} = e_{sim_i}$; $e_{exp_i} = e_{exp_i}$	34
A.3. Imagen de la estimación numérica de la disposición geométrica del campo electrostático para $d = 0,5\text{ mm}$. La flecha indica el lugar donde se tomó la intensidad de campo electrostático E_{sim}	35
A.4. Gráfica de las magnitudes de campo electrostático E_i , E_{sim_i} y E_{exp_i} , vs diferencia de potencial U_i para $d = 1\text{ mm}$: $E_i = E_i$; $E_{sim_i} = E_{sim_i}$; $E_{exp_i} = E_{exp_i}$	36
A.5. Errores de simulación (e_{sim_i}) y experimentales (e_{exp_i}), vs diferencia de potencial entre placas U_i para $d = 1\text{ mm}$: $e_{sim_i} = e_{sim_i}$; $e_{exp_i} = e_{exp_i}$	36
A.6. Imagen de la estimación numérica de la disposición geométrica del campo electrostático para $d = 1\text{ mm}$. La flecha indica el lugar donde se tomó la intensidad de campo electrostático E_{sim}	37
A.7. Gráfica de las magnitudes de campo electrostático E_i , E_{sim_i} y E_{exp_i} , vs diferencia de potencial U_i para $d = 2\text{ mm}$: $E_i = E_i$; $E_{sim_i} = E_{sim_i}$; $E_{exp_i} = E_{exp_i}$	38
A.8. Errores de simulación (e_{sim_i}) y experimentales (e_{exp_i}), vs diferencia de potencial entre placas U_i para $d = 2\text{ mm}$: $e_{sim_i} = e_{sim_i}$; $e_{exp_i} = e_{exp_i}$	38
A.9. Imagen de la estimación numérica de la disposición geométrica del campo electrostático para $d = 2\text{ mm}$. La flecha indica el lugar donde se tomó la intensidad de campo electrostático E_{sim}	39
A.10. Gráfica de las magnitudes de campo electrostático E_i , E_{sim_i} y E_{exp_i} , vs diferencia de potencial U_i para $d = 3\text{ mm}$: $E_i = E_i$; $E_{sim_i} = E_{sim_i}$; $E_{exp_i} = E_{exp_i}$	40
A.11. Errores de simulación (e_{sim_i}) y experimentales (e_{exp_i}), vs diferencia de potencial entre placas U_i para $d = 3\text{ mm}$: $e_{sim_i} = e_{sim_i}$; $e_{exp_i} = e_{exp_i}$	40
A.12. Imagen de la estimación numérica de la disposición geométrica del campo electrostático para $d = 3\text{ mm}$. La flecha indica el lugar donde se tomó la intensidad de campo electrostático E_{sim}	41

A.40. Gráfica de las magnitudes de campo electrostático E_i , E_{sim_i} y E_{exp_i} , vs diferencia de potencial U_i para $d = 20\text{ mm}$: $E_i = E_i$; $E_{sim_i} = E_{sim_i}$; $E_{exp_i} = E_{exp_i}$	60
A.41. Errores de simulación (e_{sim_i}) y experimentales (e_{exp_i}), vs diferencia de potencial entre placas U_i para $d = 20\text{ mm}$: $e_{sim_i} = e_{sim_i}$; $e_{exp_i} = e_{exp_i}$	60
A.42. Imagen de la estimación numérica de la disposición geométrica del campo electrostático para $d = 20\text{ mm}$. La flecha indica el lugar donde se tomó la intensidad de campo electrostático E_{sim}	61
C.1. Configuración de electrodos en un deshidratador electrostático. FUENTE: [4]	64
C.2. Inyector de combustible con dos mayas conductoras paralelas. FUENTE: [5].	64
C.3. Primer prototipo de la herramienta eléctrica. FUENTE: Los autores.	66
C.4. Foto tomada durante la construcción de la herramienta electrostática. FUENTE: Los autores.	67

LISTA DE TABLAS

1.	Características eléctricas del material polimérico usado en la carcasa exterior de la herramienta. FUENTE: [22].	21
2.	Distancias entre placas d . Para cada una de ellas, el rango de diferencia de potencial U empleado y el paso entre muestra y muestra. FUENTE: Los autores.	25
4.	Condiciones para arco eléctrico. FUENTE: Los autores.	27
3.	Rangos de operación del generador electrostático para la bomba PEDROLLO CKm 80-E. FUENTE: Los autores.	29
5.	Tabla de datos para $d = 0,5\text{ mm}$	35
6.	Tabla de datos para $d = 1\text{ mm}$	37
7.	Tabla de datos para $d = 2\text{ mm}$	39
8.	Tabla de datos para $d = 3\text{ mm}$	41
9.	Tabla de datos para $d = 4\text{ mm}$	43
10.	Tabla de datos para $d = 5\text{ mm}$	45
11.	Tabla de datos para $d = 6\text{ mm}$	47
12.	Tabla de datos para $d = 8\text{ mm}$	49
13.	Tabla de datos para $d = 10\text{ mm}$	51
14.	Tabla de datos para $d = 12\text{ mm}$	53
15.	Tabla de datos para $d = 14\text{ mm}$	55
16.	Tabla de datos para $d = 16\text{ mm}$	57
17.	Tabla de datos para $d = 18\text{ mm}$	59
18.	Tabla de datos para $d = 20\text{ mm}$	61

RESUMEN

TÍTULO: *DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE UN GENERADOR DE CAMPO ELECTROSTÁTICO EN UN BANCO DE PRUEBAS DEL CAMPO ESCUELA COLORADO.*¹

AUTORES: Marco Andrés Arias Torres, Byron Daniel Campo Zúñiga.²

PALABRAS CLAVE: Campo Eléctrico, Generador Electroestático, Permitividad, Pruebas de Laboratorio, Simulación Computacional, Tubería de Tratamiento.

DESCRIPCIÓN:

El presente artículo describe el diseño y la construcción de un dispositivo capaz de establecer un campo electrostático paralelo al flujo de un líquido en una tubería. El dispositivo generador basa su funcionamiento en una configuración de placas planas paralelas sometidas a una diferencia de potencial, gracias a una fuente de alta tensión que está diseñada para entregar 10 kV . El modelo utilizado para describir el comportamiento electrostático de la herramienta eléctrica, se validó en laboratorio y mediante simulación numérica computacional. En la experiencia de laboratorio se obtuvo la magnitud de la fuerza entre las placas y a partir de este valor se encontró, de manera indirecta, la magnitud de campo electrostático y la permitividad eléctrica del líquido. Por medio de la simulación y con el valor de permitividad experimental, se estimó, además de la intensidad, la disposición geométrica del campo generado. Se validó un rango de operación para la intensidad de campo electrostático de entre 0 y $1\frac{\text{kV}}{\text{mm}}$. El rango de distancia recomendada entre las placas es de 5 a 14 mm . La fuente entregó un máximo de 8 kV de acuerdo a su corriente de corto circuito. Para una bomba con caudal volumétrico entre 5 y 55 litros por minuto, el tiempo de exposición que se obtuvo estuvo entre 10,71 y $329,87\text{ ms}$.

¹Proyecto de Grado. Modalidad investigación.

²Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Ph.D. Hermann Raul Vargas Torres. Codirectores: M.Sc. Emiliano Ariza León, M.Sc. Cristian Jiménez Leiva.

ABSTRACT

TITLE: *DESIGN, CONSTRUCTION AND INSTALLATION OF AN ELECTROSTATIC GENERATOR IN A TEST LOOP OF CAMPO ESCUELA COLORADO.*³

AUTHORS: Marco Andrés Arias Torres, Byron Daniel Campo Zúñiga.⁴

KEYWORDS: Computer Simulation, Electric Field, Electrostatic Generator, Laboratory Test, Permittivity, Treatment Pipe.

DESCRIPTION:

This article describes the design and construction of a device capable of establishing an electrostatic field parallel to the flow of a fluid in a pipe. The generator device bases its operation in a parallel flat plates configuration subjected to a potential difference, thank to a high voltage supply that is designed to delivery 10 kV . The used model to describe the electrostatic behavior, was validated in a laboratory and through a computer numeric simulation. In the laboratory experience, the magnitude of the electrostatic field and the electric permittivity of the liquid were obtained indirectly, through the force magnitud between the plates. Thanks to the simulation and with the experimental permittivity value, was estimated, in addition to the intensity, the geometric layout of the generated field. An operating range for the intensity of electrostatic field was validated between 0 and $1\frac{\text{kV}}{\text{mm}}$. The recommended distance range between the plates is from 5 to 14 mm . The source just delivered 8 kV based on the short circuit current. For a pump with volumetric flow between 5 and 55 liters per minute, the exposure time is between 10,71 and 329,87 ms .

³Work Degree.

⁴Electrical Engineering School. Director: Hermann Raúl Vargas Torres. Codirectors. M.Sc. Emiliano Ariza León, M.Sc. Cristian Jiménez Leiva.

Introducción

Muchas industrias en la actualidad hacen uso de tecnologías basadas en campos electrostáticos. Por ejemplo, la industria de la automatización hace uso de detectores de movimiento[1], la industria de la computación comercializa *ratones* de computadores[2] y la automotriz implementa *airbags* como sistemas de seguridad pasiva[3], entre otras.

La industria petroquímica también hace uso de los campos electrostáticos en los deshidratadores de crudo[4] e inyectores de combustible[5].

Recientemente, esta industria investiga si estos campos pueden contribuir a la solución de problemas operativos que afectan la explotación de campos petroleros[6]. Por ejemplo, los crudos parafínicos¹ tienen el problema de que son propensos a cristalizar y a precipitarse con la disminución de la temperatura. Esto produce pérdidas económicas por la disminución o suspensión de la producción² [7, 8].

En [10] se adaptó un capacitor de mallas paralelas en contacto directo con una muestra de crudo asfáltico en un viscosímetro capilar³. Se generó una intensidad de campo electrostático de $1000 \frac{V}{mm}$ en dirección del fluido. En [11] se plantea la adición de pequeñas partículas de parafina o asfaltenos, junto con la aplicación de un campo eléctrico paralelo a la dirección del flujo. Esta vez, el campo electrostático tiene una magnitud de $800 \frac{V}{mm}$. Se observó una disminución en la viscosidad en más del 30% debido, en mayor proporción, al tratamiento eléctrico y al aumento de la temperatura [12, 11]. En [13], se hicieron tratamientos electrostáticos a emulsiones⁴ de agua y crudo en un reómetro⁵. Se observó una disminución en la viscosidad, mejorando la fluidez del crudo. En [14], se concluye que hay interpretaciones erróneas en la reología⁶ del crudo en [11], ya que existe evidencia que demuestra que la adición de parafinas o asfaltenos a muestras de crudo parafínico, provoca un aumento progresivo de la viscosidad. En [15] se realiza un análisis con un reómetro y una fuente de continua de alta tensión, en un crudo de baja viscosidad. Para una intensidad de hasta $800 \frac{V}{mm}$ y variación de la temperatura, se encontró una reducción en la viscosidad. Superado este límite, la viscosidad aumentaba considerablemente gracias al efecto Joule ya que el aumento de la temperatura evapora las fracciones livianas del crudo. Por último, en [16], se diseñó un sistema que simula el flujo del crudo en una tubería, en el cual se aplicó un campo eléctrico de $1200 \frac{V}{mm}$ en la misma dirección y en contacto con el crudo. Se encontró que el caudal aumentó en más del 21% y la viscosidad disminuyó en un 21%.

Un problema similar se encuentra en el Campo Escuela Colorado⁷ (C.E.C.), el cual presenta problemas de movilidad del crudo a lo largo de las tuberías de producción, debido a la precipitación de sólidos[8]. En busca de una solución para el control de depósitos orgánicos, se inició la construcción de un banco de pruebas para probar a nivel de laboratorio una herramienta con principios magnéticos y eléctricos que contribuya a la remoción o prevención de orgánicos (figura 0.1).

La finalidad de este banco de pruebas es simular las condiciones de fondo de pozo con variables como la temperatura y el caudal en crudo de pozos del campo Colorado[17]. En este, se pretende observar la movilidad de muestras de crudo mientras son sometidas a campos eléctricos y magnéticos[18].

Este trabajo presenta el diseño y la construcción del dispositivo empleado en dicho banco para la generación de campo electrostático. Este campo debe ir en dirección paralela al flujo del líquido y basa su diseño en una configuración de placas planas paralelas para generar el campo electrostático.

En [7] se recomienda, para el crudo de C.E.C. y para este tipo de tratamiento, una intensidad de $500 \frac{V}{mm}$ y 40 s de exposición. Mientras que en [16] una de $800 \frac{V}{mm}$ con 5 s de exposición.

El generador presentado en este trabajo se diseñó para operar a la temperatura (ambiente y hasta 80° C) y el caudal (5 y hasta 55 litros por minuto) del banco de pruebas, generando una intensidad de campo en un rango entre 0 y $1 \frac{kV}{mm}$. El tiempo de exposición escapa a las consideraciones del diseño, ya que depende del

¹Son crudos que están constituidos en su mayoría por hidrocarburos saturados y alcanos, con alto peso molecular y extensas cadenas de carbonos.

²Esta pérdida en la capacidad de flujo se suele cuantificar mediante parámetros experimentales como la viscosidad, el punto de nube (PN) y el punto de fluidez (PF). [9]

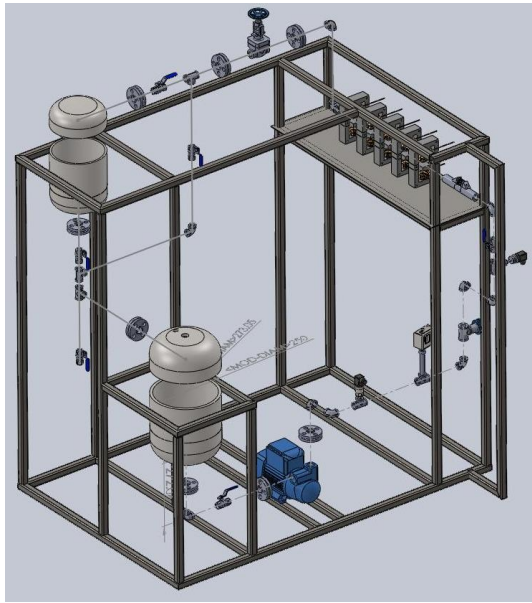
³Instrumento que permite medir la viscosidad de un fluido.

⁴Gotas de agua dispersas en petróleo crudo, es decir emulsión de agua/aceite, ó, gotas de petróleo crudo dispersas en agua, es decir emulsión de aceite/agua. [4]

⁵Instrumento que permite medir propiedades mecánicas como la viscosidad (entre otras) de un fluido, bajo influencia de fuerzas externas.

⁶Ciencia que estudia la deformación y el flujo de los materiales.

⁷Campo localizado en la Cuenca Valle Medio del Magdalena, en la antigua concesión De Mares (San Vicente de Chucurí - Santander - Colombia). Para el año 2008 habían 33 pozos abandonados, 34 inactivos y 7 potencialmente activos. De estos, 4 estaban en producción y los restantes 3 se encontraban abandonados.[8]



(a) Diseño por computador del banco de pruebas.



(b) Banco de pruebas en construcción. El círculo rojo señala el lugar dispuesto para la instalación del generador electrostático.

Figura 0.1: Banco de Pruebas. FUENTE: [17].

caudal del crudo que fluye por la tubería (ver ecuación (2.1) en pié de página 10). Sin embargo, y a manera de ejemplo, para una bomba PEDROLLO CKm 80-E, el tiempo de exposición está entre 10,71 y 329,87 ms.

Este artículo presenta los criterios electrostáticos empleados en el diseño y hace una presentación detallada de la herramienta. En la sección 2, presenta los criterios de diseño, en la sección 3, expone los detalles del generador electrostático, en la 4 un desarrollo experimental para validar el modelo, en el 5 una corrida de simulación para estimar la configuración geométrica del campo electrostático y por último presenta unas observaciones y conclusiones. Los anexos A y B, presentan las demostraciones del modelo matemático empleado en el montaje experimental, así como datos y gráficos obtenidos.

1. Criterios de diseño eléctrico.

Como punto de partida del diseño del generador, se empleó una configuración de placas finitas planas paralelas, como las mostradas en la figura 1.1.

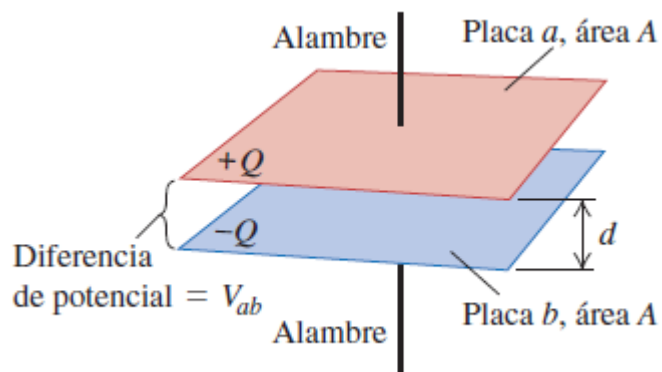


Figura 1.1: Placas planas paralelas. FUENTE: [19], p 817.

En estas, la intensidad de campo electrostático E que se configura entre ellas, al someterlas a una diferencia de potencial $U = V_{ab}$, es:

$$E = \frac{U}{d} \quad (1.1)$$

donde d es la distancia de separación entre las placas⁸.

2. Presentación del generador electrostático

Con base en la sección 1, las placas de la herramienta son geoméricamente planas y paralelas entre si, como lo muestra la figura 2.1.

Estas placas son circulares por estar dispuestas dentro de un contenedor con forma cilíndrica; además, se logra una fabricación más rápida y económica. Son perforadas para que el líquido pueda circular a través del tratamiento y su flujo sea paralelo al campo electrostático aplicado, de acuerdo con lo establecido en [21]. El aluminio laminado es el material usado en la construcción de las placas por su rigidez, poco peso, maleabilidad y disponibilidad en el mercado. Además es un material no ferromagnético; lo que evita la influencia de campos magnéticos externos sobre el generador⁹.

El diámetro de cada placa es $\varnothing = 50 \text{ mm}$. Este diámetro es el máximo, teniendo en cuenta el espacio para la instalación del generador en el banco de pruebas. Se busca el diámetro máximo posible de las placas ya que permite una mayor exposición del líquido al campo generado¹⁰. El diámetro y la cantidad de perforaciones, deben responder a un equilibrio entre los efectos de rozamiento mecánico con el líquido y la uniformidad de la configuración geométrica del campo electrostático generado. En el caso de esta herramienta, este equilibrio se situó de tal manera que el área total en huecos por placa (nA_H , donde n es el número total de huecos en una placa y A_H es el área de la perforación de cada hueco) fuera igual al área del hueco de la sección transversal de la tubería del banco. Ver indicador 8 de la figura 2.1b.

Las placas, como lo muestran las figuras 2.1c y 2.1d, se encuentran instaladas al interior de un contenedor cilíndrico polimérico que sirve de soporte mecánico y a la vez provee el aislamiento eléctrico necesario. La tabla 1 muestra las características eléctricas¹¹ del material polimérico.

⁸La ecuación (1.1) es resultado de la definición de diferencia de potencial. Para la disposición mostrada en la gráfica 1.1 la diferencia de potencial U es:

$$U = V_{y_1} - V_{y_2} = - \int_{y_1}^{y_2} \vec{E} \cdot d\vec{l} = E \int_{y=0}^{y=d} dy = E \cdot d \quad (1.2)$$

Aquí, el eje y atraviesa perpendicularmente las placas. La placa cargada positivamente se encuentra en $y = d$ y la cargada negativamente en $y = 0$. El campo eléctrico va, por definición, de la placa con carga positiva hacia la cargada negativamente; es decir, $\vec{E} = E(-\vec{a}_y)$, donde \vec{a}_y es el vector unitario del eje y en el sistema de coordenadas cartesianas.[20]

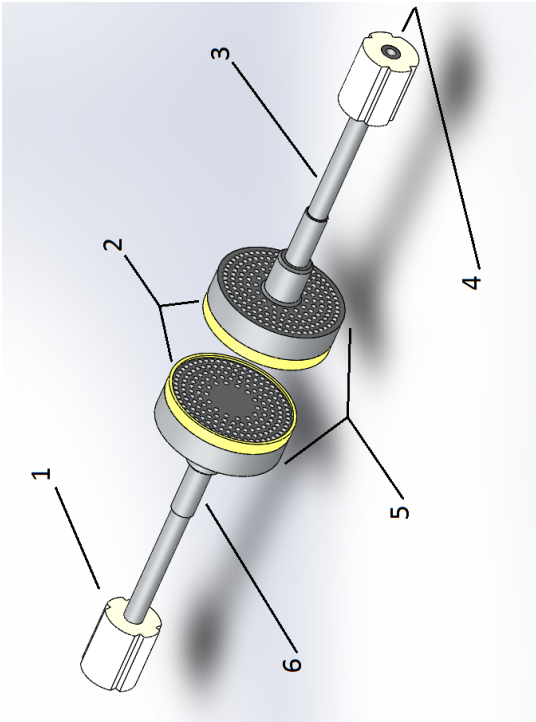
⁹En el banco de pruebas será posible generar simultáneamente fenómenos magnéticos.

¹⁰La ecuación que relaciona el tiempo de exposición τ con el diámetro de las placas \varnothing parte de la definición de caudal Q para una tubería cilíndrica:

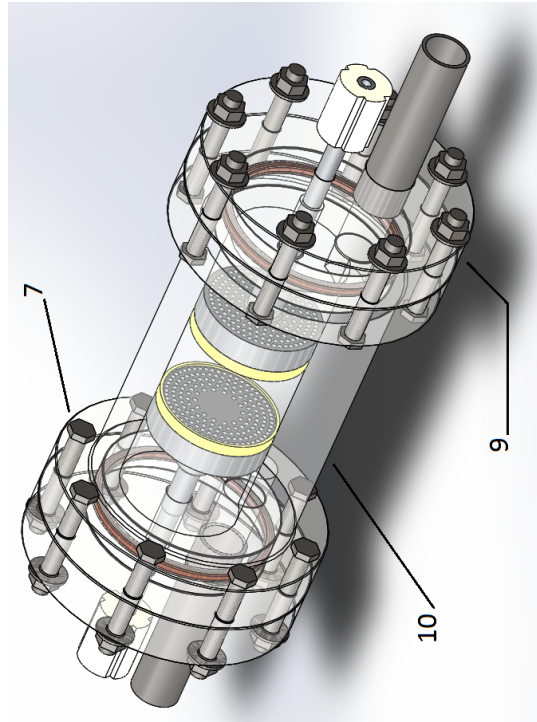
$$Q = A_p v = \underbrace{\pi \left(\frac{\varnothing}{2}\right)^2}_{A_p} \cdot \underbrace{\frac{d}{\tau}}_v \quad (2.1)$$

Donde A_p es el área de la sección circular de la tubería y v es la velocidad a la que fluye el líquido. La ecuación (2.1) expresa que, para un Q constante, $\tau \propto \varnothing^2$, así como para una d constante $\tau \propto 1/Q$.

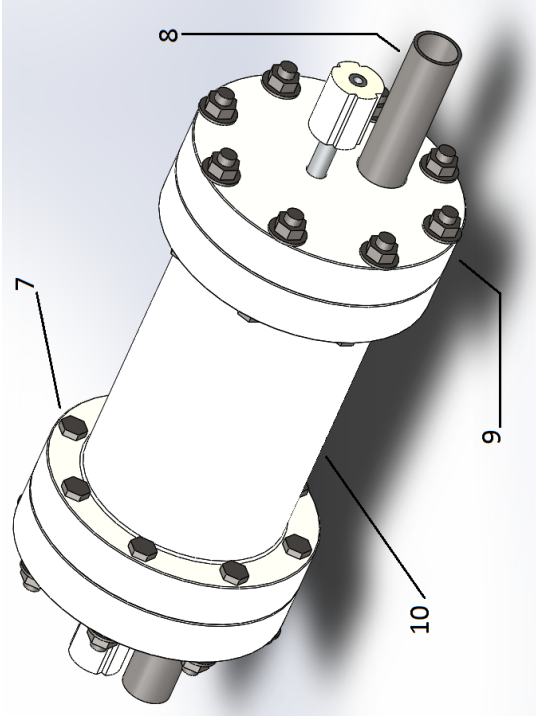
¹¹A temperatura ambiente: aproximadamente 23° C .



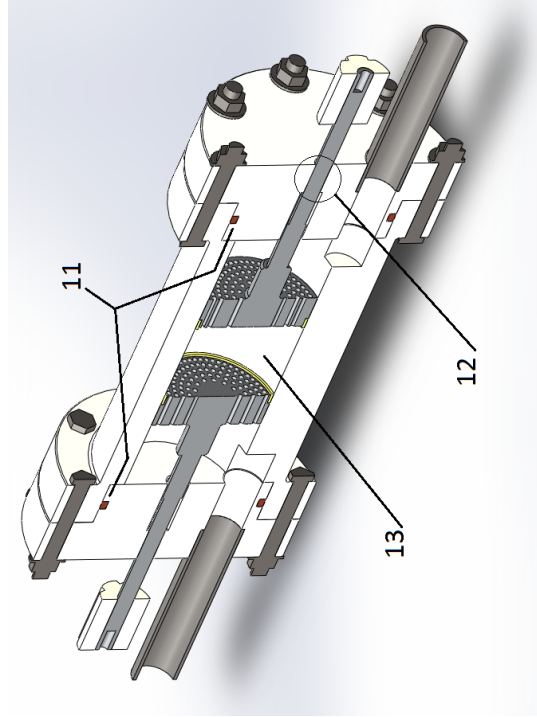
(a) Placas planas agujereadas enfrentadas. 1: Agarre aislante. 2: Anillos de material polimérico. 3: Sección roscada del eje. 4: Clavijero. 5: Placas perforadas. 6: Eje longitudinal de soporte.



(c) Herramienta Eléctrica. Vista exterior con transparencia del contenedor cilíndrico polimérico (10). 7: Tornillo, tuerca y arandela para asegurar cierre. 9: Tapa en vista transparente.



(b) Herramienta Eléctrica: Vista exterior. 7: Tornillo, tuerca y arandela para asegurar cierre. 8: Tubería del banco de acero inoxidable. 9: Tapa polimérica de cierre. 10: Contenedor cilíndrico polimérico.



(d) Herramienta Eléctrica. Corte longitudinal. 11: O-ring en Viton para prevenir fugas. 12: Rosca de sujeción de placas. 13: Cavidad Interna del cilindro.

Figura 2.1: Herramienta Eléctrica. FUENTE: Los autores.

Tabla 1: Características eléctricas del material polimérico usado en la carcasa exterior de la herramienta. FUENTE: [22].

PARÁMETRO	VALOR
Nombre	Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular
Símbolo	UHMW-PE
Rigidez dieléctrica	$43 \frac{kV}{mm}$
Resistividad volumétrica	$> 10^{14} \Omega \cdot cm$
Resistividad superficial	$10^{12} \Omega$
Permitividad relativa a baja frecuencia.	2,3

La distancia máxima entre placas permitida por el contenedor construido es $d = 65 mm$.

Cada placa fija su posición gracias al eje longitudinal roscado mostrado en la figura 2.1a. Éste, además de proveer soporte mecánico, sirve de clavijero para conectar la fuente de tensión que provee la diferencia de potencial al sistema.

Un anillo de material polimérico (figura 2.1a), previene posibles corto circuitos y garantiza una distancia mínima entre las placas ($2 mm$), que evita la aparición de arcos eléctricos. Para ver en detalle el proceso de diseño de la herramienta, ir al anexo C.

El sistema es energizado por la *Fuente de Alta Tensión Leybold 521 70*, mostrada, junto con sus especificaciones generales, en la figura 2.2.



(a) Vista frontal.

SALIDA	CARACTERÍSTICA
1	0 a 5 kV DC / Corriente de corto circuito: 2 mA
2	0 a 5 kV DC / Corriente de corto circuito: 200 μA
Serie 1 - 2	0 a 5 kV DC / Corriente de corto circuito: 200 μA
	5 kV a 10 kV DC / Corriente de corto circuito: 100 μA

(b) Hoja de datos.

Figura 2.2: Fuente de Alta Tensión Leybold 521 70. FUENTE: [23].

3. Montaje experimental

Con el fin de hacer una validación experimental del modelo de la ecuación (1.1), se hizo una adaptación del montaje *Leybold - Balanza de Tensión de Kirchhoff P3.1.4.2*. (ver figura 3.1) y se usó como líquido de prueba (en reposo) una muestra de crudo del pozo Colorado 67¹².

Las placas a, b y c del montaje mostrado en la figura 3.1 se removieron y en su lugar se adaptaron las placas réplica de la figura 3.2. Estas últimas, como su nombre lo indica, son réplica de las placas dispuestas al interior del generador construido. Para mas detalle ver anexo D.

Se adaptó un vaso contenedor donde depositar el líquido para las pruebas. La figura 3.3 hace una comparación visual del montaje original (figura 3.3a) con el adaptado (figuras 3.3b y 3.3c).

Este montaje permite obtener una medida indirecta de la permitividad del líquido ε_i , indispensable en la corrida de simulación, y la intensidad de campo electrostático E_{exp_i} a partir de las siguientes expresiones:

$$\varepsilon_i = \frac{2d_j^2 10^{-3} F_i}{10^6 U_i^2 (A_T - nA_H)} \quad (3.1)$$

¹²Para la caracterización del crudo del pozo Colorado 36, ir a [24].

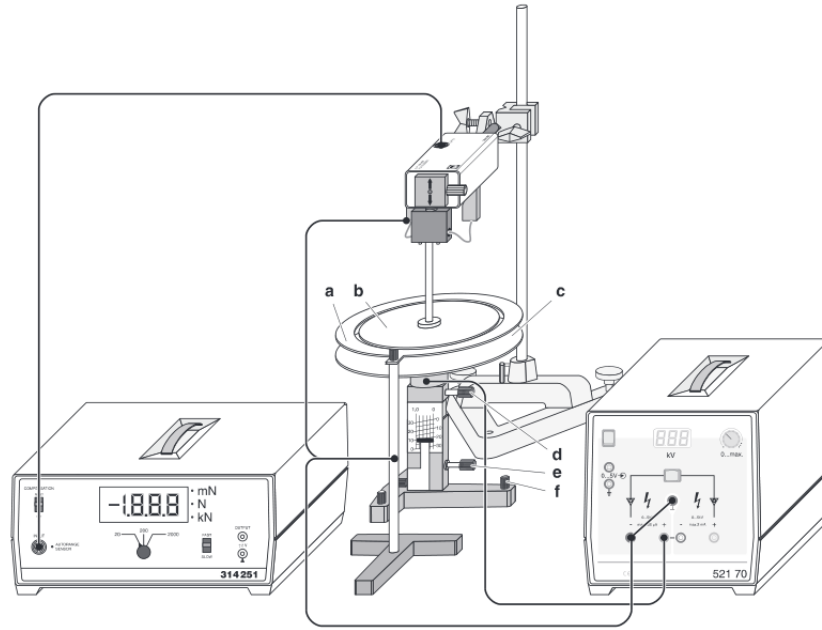


Figura 3.1: Montaje *Leybold - balanza de tensión de Kirchoff P3.1.4.2.* para medición de la fuerza entre placas cargadas. a: Placa superior exterior. b: Placas superior interior. c: Placa inferior. d: Perilla de sujeción placa inferior. e: Perilla de fijación placa inferior. f: Perilla de nivelación. FUENTE: [25].

$$E_{exp_i} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-3} F_i}{\varepsilon_i (A_T - n A_H)}} \cdot 10^3 \quad (3.2)$$

Donde n es el número total de huecos, A_T y A_H son el área total de la placa en $[m^2]$ y el área de cada hueco en $[m^2]$ respectivamente, F_i en $[mN]$ es la fuerza electrostática entre las placas medida en el *Instrumento Universal de Medidas Físicas Leybold 531 835* (ver figura 3.4) y U_i en $[kV]$ es la diferencia de potencial establecida por la fuente. El Anexo B, presenta la demostración de las ecuaciones (3.1) y (3.2).

Adicionalmente se realizó la medición de la corriente circulante en el crudo como se muestra en la figura 3.5. Esto con el propósito de no sobrepasar el límite de aparición de arco eléctrico.

La gráfica del montaje realizado en el laboratorio es mostrado en la figura 3.6.

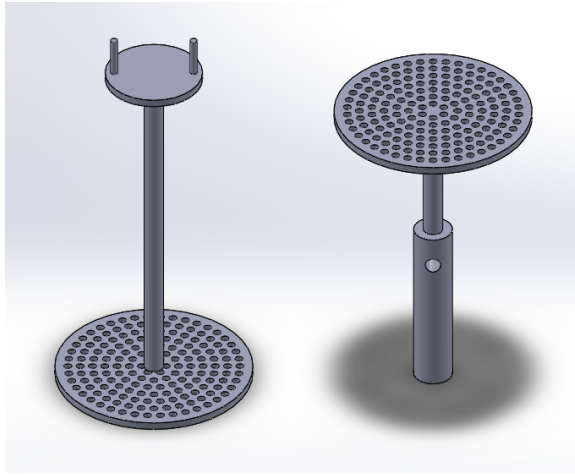
El procedimiento general para la toma de datos fue el siguiente:

1. Ajustar distancia entre placas d_j .
2. Ajustar tensión en la fuente U_i .
3. Tomar la medida de fuerza electrostática F_i .
4. Tomar la medida de corriente I_i medida por el multímetro y entregada por la fuente.
5. Ajustar un nuevo valor de tensión $U_{i+1} = U_i + U_{paso}$.
6. Repetir pasos 3 y 4 hasta cuando se active el sistema de protección de la fuente de alta tensión¹³.
7. Ajustar una nueva distancia entre placas $d_{j+1} = d_j + d_{paso}$.
8. Repetir todos los pasos hasta que $d_j = 20 \text{ mm}$.¹⁴

Los tabla 2 muestra los valores de distancia entre placas d_j , su rango de tensión en la fuente U_i y el paso de tensión U_{paso} .

¹³Esto se da cuando se presentan arcos eléctricos entre en las placas o se alcanza la corriente de corto circuito. Ver figura 2.2b.

¹⁴Esto en base al límite de tensión entregado por la fuente (10 kV) para cumplir con la intensidad de campo mínima ($500 \frac{V}{mm}$).

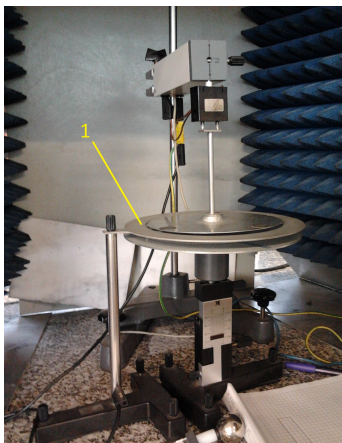


(a) Diseño por computador de las placas réplica.

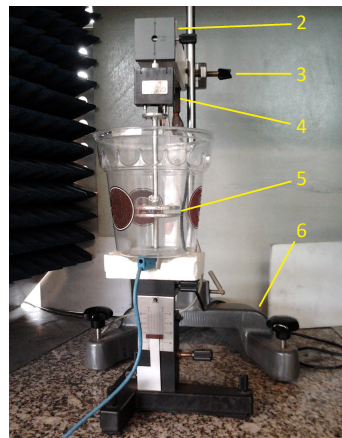


(b) Imagen real de las placas réplica.

Figura 3.2: Placas Réplica adaptadas al montaje de la figura 3.1. FUENTE: Los autores.



(a) Disposición original de las placas en el sistema Balanza de Tensión de Kirchhoff. 1: Placas planas paralelas originales.



(b) Montaje con adecuación de réplica de placas. 2: Sensor de fuerza. 3: Perilla de ajuste de altura. 4: Acople al sensor. 5: Contenedor y placas réplica. 6: Soporte universal.



(c) Montaje de placas inmersas en crudo. 7: Contenedor con crudo (placas réplica inmersas) 8. Perilla de sujeción de placa inferior. 9: Escala graduada de altura de placa réplica inferior. 10: Perilla de fijación de altura de placa réplica inferior. 11. Soporte de contenedor y placa inferior.

Figura 3.3: Adaptación del montaje *Balanza de Tensión de Kirchhoff Leybold P3.1.4.2.* con placas réplica. FUENTE: Los autores.



(a) Instrumento Universal de Medidas Físicas. FUENTE: [26].



(b) Sensor de Fuerza. FUENTE: [27].

CARACTERÍSTICA	VALOR	
	<i>Inf - Sup</i>	Resolución
Rango	0 a 20 <i>mN</i>	0,01
	0 a 200 <i>mN</i>	0,1
	0 a 2000 <i>mN</i>	1
Presición	<i>Error < 1 % del valor medido</i>	

(c) Hoja de datos.

Figura 3.4: Instrumento Universal de Medidas Físicas Leybold 531 835 y su Sensor de Fuerza Leybold 524 060 empleados para la medición de la fuerza electrostática.

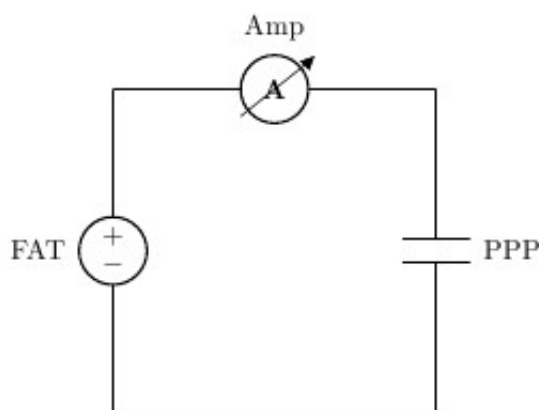


Figura 3.5: Circuito eléctrico establecido para medición de corriente. FAT: Fuente de alta tensión. Amp: Amperímetro digital. PPP: Placas planas paralelas. FUENTE: Los autores.

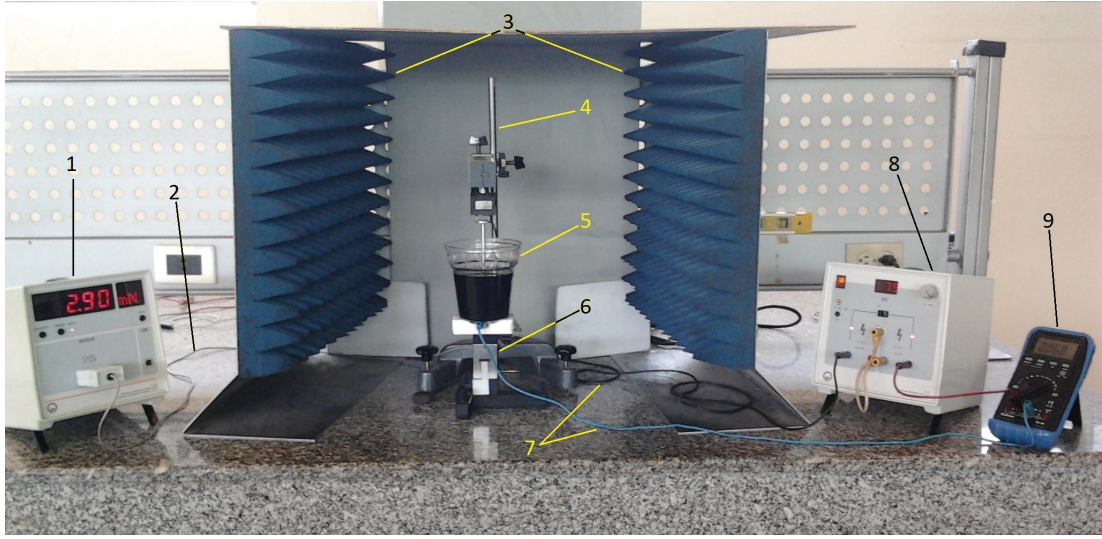


Figura 3.6: Montaje en laboratorio para desarrollo experimental. 1: Instrumento universal de medidas físicas. 2: Cable del sensor. 3: Amortiguadores de viento. 4: Soporte universal. 5: Contenedor con crudo (placas inmersas). 6: Escala graduada de altura. 7: Cables de alimentación. 8: Fuente de alta tensión. 9: Amperímetro digital.

Tabla 2: Distancias entre placas d . Para cada una de ellas, el rango de diferencia de potencial U empleado y el paso entre muestra y muestra. FUENTE: Los autores.

d_j [mm]	Rango de U_i [kV]	Paso U_{paso} [kV]
0,5	[0, 1 : 1]	0, 1
1	[0, 2 : 2]	0, 2
2	[0, 2 : 5]	[0, 2 : 1] = 0, 2; [1 : 5] = 0, 5
3	[0, 5 : 5]	0, 5
4	[0, 5 : 5]	0, 5
5	[0, 5 : 5, 1]	0, 5
6	[0, 5 : 5, 5]	0, 5

d_j [mm]	Rango de U_i [kV]	Paso U_{paso} [kV]
8	[0, 5 : 6, 1]	0, 5
10	[0, 5 : 6, 6]	0, 5
12	[0, 5 : 7]	0, 5
14	[0, 5 : 7, 3]	0, 5
16	[0, 5 : 7, 5]	0, 5
18	[0, 5 : 7, 6]	0, 5
20	[0, 5 : 7, 9]	0, 5

Por otro lado, la ecuación

$$e_{exp_i} = \frac{|E_{exp_i} - E_i|}{E_{exp_i}} 100 \quad (3.3)$$

donde e_{exp_i} es el error porcentual de cada prueba, permite encontrar la diferencia porcentual entre la intensidad de campo electrostático experimental E_{exp_i} de la ecuación (1.1) y el modelo aproximado asumido $E_i = \frac{U_i}{d_j}$.¹⁵

4. Simulación numérica computacional

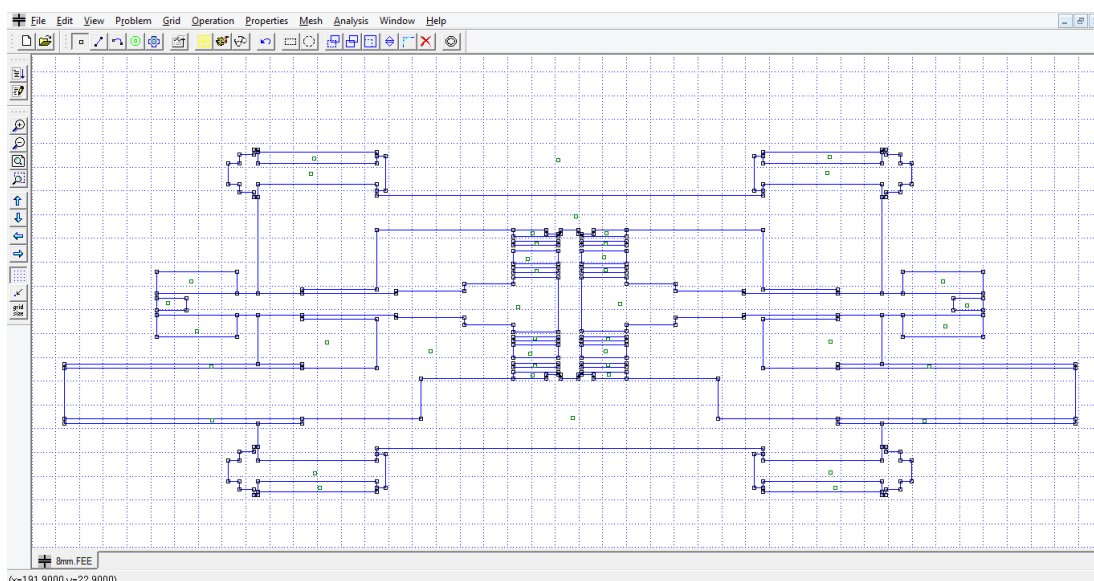
El software empleado para la simulación numérica computacional fue FEMM v4.2¹⁶. Este estima la intensidad de campo electrostático E_{sim_i} para cada punto de la gráfica. El software realiza la estimación por elementos finitos[28] con una precisión mínima de $1 \cdot 10^{-8}$.

El software no tiene soporte tridimensional para el ingreso y simulación de gráficos. Sin embargo, las estimaciones para el generador electrostático se asumieron válidas gracias a la simetría de las placas respecto a su eje longitudinal.

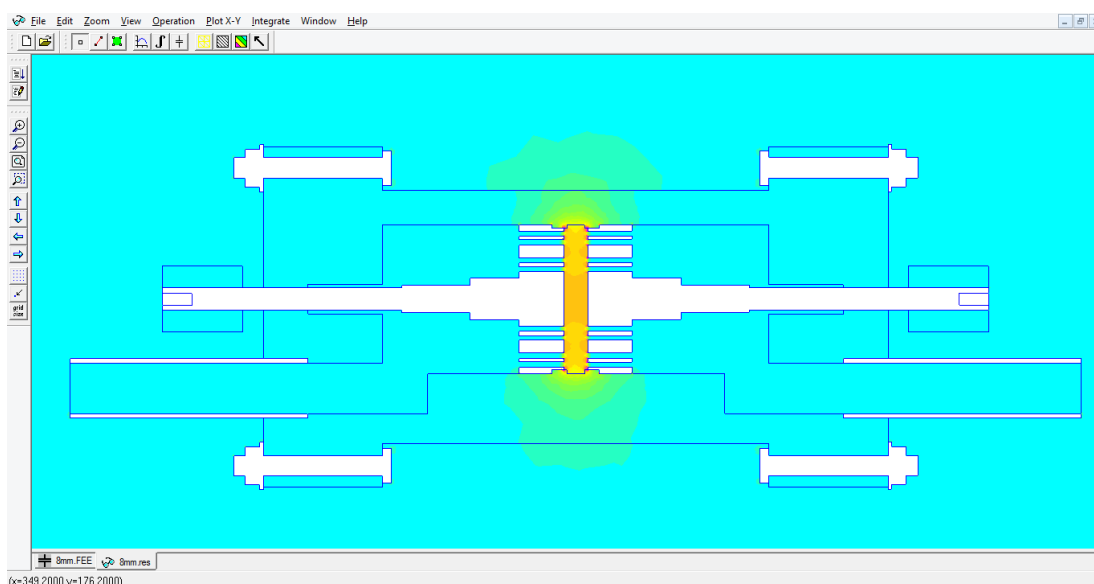
¹⁵Debido a la incertidumbre que presenta el modelo teórico (E_i) y la simulación (E_{sim_i}) del sistema se tomo como referencia la intensidad experimental obtenida (E_{exp_i}).

¹⁶Aladdin Free Public License.

El entorno de diseño de FEMM v4.2 (figura 4.1a) y el entorno de resultados gráficos (figura 4.1b) se muestran en la figura 4.1.



(a) Entorno de diseño.



(b) Entorno de visualización de resultados de simulación.

Figura 4.1: Entornos del software de simulación FEMM v4.2. con el gráfico de la herramienta en corte longitudinal. Placas separadas a una distancia $d = 8\text{ mm}$ y una diferencia de potencial entre ellas de $U = 4\text{ kV}$. FUENTE: Los autores.

Las simulaciones para cada d_j se muestran en el anexo A.

De un mismo punto equidistante a las placas, se tomaron todos los valores de intensidad de campo electrostático simulado E_{sim_i} .

El valor empleado de permitividad relativa del crudo en la simulación parte de la ecuación (3.1), y ya que a cada muestra corresponde un único valor de permitividad relativa ϵ_r [20, 29], se hizo un promedio de todos los ϵ_i encontrados experimentalmente con la ecuación (3.1).¹⁷

¹⁷En el Anexo A se encuentran las gráficas de ϵ vs U_i , donde se puede observar el comportamiento de los datos alrededor de ϵ_j .

$$\varepsilon_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \quad (4.1)$$

Este ε_j es la permitividad asumida para cada d_j . La permitividad relativa es entonces:

$$\varepsilon_{r_j} = \frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_0} \quad (4.2)$$

donde $\varepsilon_0 \approx 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$ es la permitividad del espacio vacío. Luego la ε_r del crudo, empleada en la simulación numérica computacional es el promedio de todos ε_{r_j} obtenidos a las distancias d_j donde el error e_{exp_i} fue menor al 3%, así como lo muestra la ecuación (4.3).

$$\varepsilon_r = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \varepsilon_j \quad (4.3)$$

Por último, la comparación de E_{sim_i} respecto a E_{exp_i} se hizo con la expresión de la ecuación (4.4):

$$e_{sim_i} = \frac{|E_{exp_i} - E_{sim_i}|}{E_{exp_i}} 100 \quad (4.4)$$

5. Resultados

La figura 5.1 muestra el generador electrostático construido y su instalación en el banco de pruebas del Campo Escuela Colorado.

Basados en la ecuación (2.1), los tiempos mínimos y máximos de exposición, para una bomba PEDROLLO CKm 80-E con caudal entre 5 y 55 litros por minuto ($Q_{min} = 83333,33 \frac{mm^3}{s}$ y $Q_{max} = 916333,33 \frac{mm^3}{s}$) son:

$$\tau_{max} = \frac{\pi \left(\frac{\varnothing}{2}\right)^2 d_j}{Q_{min}} \quad (5.1)$$

$$\tau_{min} = \frac{\pi \left(\frac{\varnothing}{2}\right)^2 d_j}{Q_{max}} \quad (5.2)$$

La tabla 3, resume los resultados obtenidos en el montaje experimental y la simulación numérica computacional; así, como los tiempos de exposición para una bomba PEDROLLO CKm 80-E instalada en el banco de pruebas.

El anexo A muestra los datos obtenidos del montaje experimental y de la simulación numérica computacional.

Se promediaron los errores e_{exp_i} y e_{sim_i} para cada d_j :

$$e_{exp_j}^- = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_{exp_i} \quad (5.3)$$

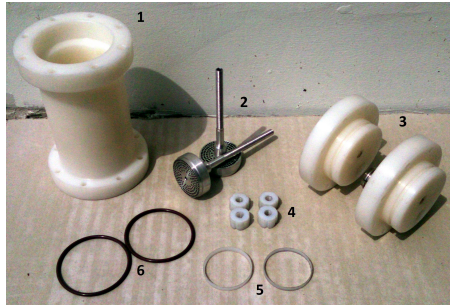
$$e_{sim_j}^- = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_{sim_i} \quad (5.4)$$

Estos errores promedio, fueron llevados a la figura 5.2.

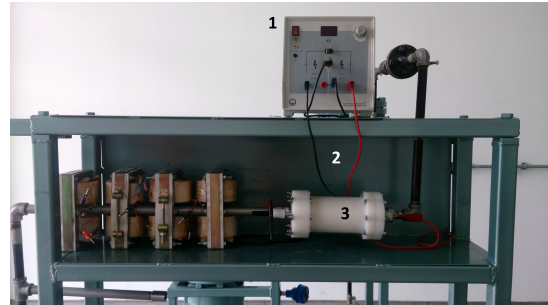
Para distancias mayores a 1 mm no se presentan arcos en el experimento de prueba. Las condiciones de distancia d_j , tensión en la fuente U_i y corriente por la muestra I_i , justo antes de la aparición del arco eléctrico se muestran en la tabla 4:

Tabla 4: Condiciones para arco eléctrico. FUENTE: Los autores.

d_j [mm]	U_i [kV]	I_i [μA]
0,5	1	100
1	2	167



(a) Piezas del generador electrostático. 1: Contenedor cilíndrico polimérico. 2: Placas planas paralelas. 3: Tapas del cilindro y sistema de acople. 4: Agarrés. 5: Anillo polimérico para placas. 6: O-rings de vitón. para prevenir filtraciones.



(b) Generador adaptado e instalado en banco de pruebas. 1: Fuente de alta tensión. 2: Cables de alimentación. 3: Generador Electrostático.



(c) Herramienta eléctrica instalada en el banco de pruebas.

Figura 5.1: Generador electrostático construido. FUENTE: Los autores.

Tabla 3: Rangos de operación del generador electrostático para la bomba PEDROLLO CKm 80-E. FUENTE: Los autores.

d_j [mm]	U_i [kV]		E_i $\frac{V}{mm}$		E_{exp_i} $\frac{V}{mm}$		E_{sim_i} $\frac{V}{mm}$		τ [ms]	
	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx
0,5	0,1	1,0	200,00	2000,00	204,06	2020,07	207,96	1999,59	1,07	11,78
1	0,2	2,0	200,00	2000,00	209,26	1997,02	198,54	1985,78	2,14	23,56
2	0,2	5,0	100,00	2500,00	98,58	2551,79	96,10	2402,38	4,29	47,12
3	0,5	5,0	166,67	1666,67	166,61	1676,75	160,48	1604,82	6,43	70,69
4	0,5	5,0	125,00	1250,00	125,65	1247,67	120,78	1207,85	8,57	94,25
5	0,5	5,1	100,00	1020,00	99,43	1025,78	96,99	985,05	10,71	117,81
6	0,5	5,5	83,33	916,67	83,26	919,61	81,00	890,95	12,86	141,37
8	0,5	6,1	62,50	762,50	62,77	770,04	60,87	742,61	17,14	188,50
10	0,5	6,6	50,00	660,00	50,69	654,61	48,67	642,40	21,43	235,62
12	0,5	7,0	41,67	538,33	41,61	582,97	40,58	567,87	25,71	282,74
14	0,5	7,3	35,71	521,43	36,53	505,32	34,69	506,65	30,00	329,87
16	0,5	7,5	31,25	468,75	34,05	460,56	30,31	454,53	34,28	376,99
18	0,5	7,6	27,78	422,22	24,40	429,61	26,87	408,25	38,57	424,11
20	0,5	7,9	25,00	395,00	23,24	384,67	24,06	380,14	42,86	471,24

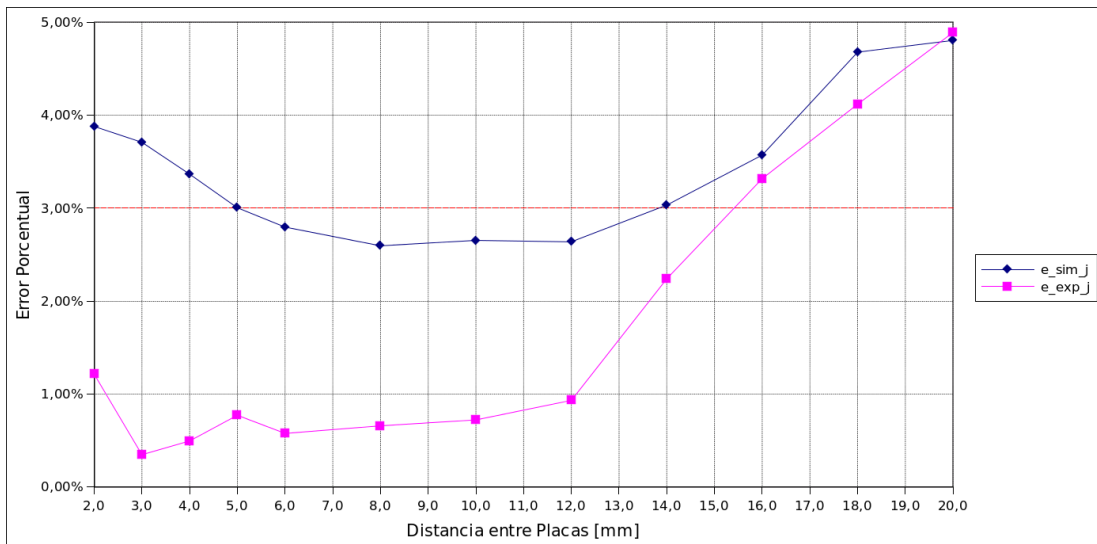


Figura 5.2: Errores promedio de los métodos (simulación y experimental) para cada d_j . FUENTE: Los autores.

La permitividad relativa promedio en el rango de $d_j = [5 : 14] mm$, dió como resultado:

$$\varepsilon_r = 2,56$$

6. Conclusiones

- Entre $d = 5 mm$ y $d = 14 mm$ se observa en la figura 5.2, que los errores promedio e_{sim} y e_{exp} están por debajo de la línea punteada roja de $\bar{e} = 3\%$, permitiendo asumir un campo eléctrico uniformemente distribuido. Es por esto que este rango se recomienda como *rango de operación* para d . Es importante señalar que dicho rango se encuentra alrededor de $d = \frac{\varnothing}{5} = 10 mm$.
- Para distancias d_j mayores a $1 mm$ no se presentaron arcos eléctricos en los experimentos de prueba. De ahí que se fijaron anillos de material polimérico de $1 mm$ de espesor en cada borde de las caras

internas de las placas de la herramienta, como se observa en la figura 2.1a. Esto, además de disminuir la probabilidad de aparición de arcos eléctricos, garantiza que las placas no hagan contacto mecánico.

- En la figura 5.2, cuando $d < 5\text{ mm}$, el error promedio por simulación se hace mayor al 3% debido a la cercanía excesiva de las placas perforadas¹⁸. En este rango, los aportes individuales de los efectos de borde de cada perforación ya no permiten un campo electrostático lo suficientemente uniforme. De manera similar, los efectos de borde para $d > 15\text{ mm}$ vuelven a ser significativos, haciendo que los errores experimentales y por simulación, se salgan del criterio del 3%. Esta vez, por una distancia excesiva entre las placas.
- La radiación proveniente del campo electrostático generado por la herramienta es de naturaleza no ionizante de frecuencia cero. La energía de dicha radiación es suficientemente baja como para ionizar la materia [30]. Por esta razón, la radiación generada por la herramienta eléctrica mientras esta se encuentra en funcionamiento, no representa peligro alguno para los operarios.¹⁹

7. Observaciones

- Las pruebas de laboratorio aquí presentadas tienen importancia adicional, en tanto que establece un método *preliminar* para encontrar, para cada muestra particular de líquido, un valor de permitividad relativa ϵ_r . Esta permitividad relativa asumida fue la empleada en la simulación numérica computacional²⁰.
- El dispositivo aquí presentado, interfiere con el modelo mecánico de la tubería en la que se instale. Este agrega caídas de presión y caudal que pueden llegar a ser considerables. Por esta razón, se recomienda su uso exclusivo en sistemas de tuberías con propósitos investigativos.
- El posible aumento de la temperatura, por la presencia de corrientes que circulan a través del crudo (efecto Joule), es un fenómeno que escapa a los alcances de este proyecto. Se recomienda entonces evaluar la temperatura del líquido siempre que el generador se encuentre en uso.

8. Recomendaciones

- Se recomienda evitar el ingreso de aire al sistema de tuberías mientras el generador está energizado. Ya que, un arco eléctrico en una burbuja que mezcle aire con constituyentes volátiles del petróleo, podría hacer ignición, poniendo en riesgo la integridad de los usuarios, los equipos y la infraestructura.
- Se recomienda, para futuras investigaciones, el estudio de la rigidez dieléctrica de las sustancias a las que se les vaya a aplicar campo electrostático con esta herramienta; ya que es un aspecto importante en la predicción de aparición de arcos eléctricos.
- Se recomienda, mejorar el diseño de la herramienta, disponiendo de otra manera los electrodos. Esto con el fin de lograr distintas disposiciones geométricas de campo electrostático.
- Se recomienda, para obtener mayores tiempos de exposición de la sustancia al campo electrostático generado, emplear bombas con caudales inferiores.

Referencias

- [1] R. Correa, J. Peña, O. Reyes, «Detector prototipo basado en un campo eléctrico», Rev. Ingenierías, Univ. de Medellín, vol. 8, núm 15, jul-dic, 2009, pp. 115-128. Medellín, Colombia.

¹⁸En este caso, dicha cercanía excesiva de las placas hace que los efectos de borde aportados por cada agujero, no permitan una disposición suficientemente uniforme de \vec{E} . Esto se puede observar en el Anexo A para distancias entre placas comprendidas entre $d = 0,5\text{ mm}$ y $d = 4\text{ mm}$.

¹⁹La ICNIRP y la EMF-NET son organizaciones no gubernamentales reconocidas por la Organización Mundial de la Salud (WHO) encargadas de estudiar y recomendar normas sobre estas radiaciones.

²⁰Las normas ASTM D117 y IEC 60247 son normas técnicas establecidas para encontrar la permitividad relativa de los materiales.

- [2] J. Smith, «Field mice: Extracting hand geometry from electric field measurements», IBM Sys. Journal, vol. 35, no. 3-4, 1996, pp. 587-608.
- [3] J. Stanley y C. White «Electric field sensing air bag danger zone sensor», U.S. Patent 5964478, Oct.12, 1999.
- [4] S. Marfisi, G. Álvarez, E. Paruta, P. Moreno, R. Antón y J-L. Salager, «Deshidratador electrostático de laboratorio para probar formulaciones desemulsionantes». Agosto 2009.
- [5] R. Tao, K. Huang, H. Tang, y D. Bell. «Electrorheology leads to efficient combustion». Energy & Fuels, vol. 22, Ago. 2008, Dep. of Physics, Temple Univ., Phil., Pennsylvania, pp. 3785-3788.
- [6] C. Villabona y D. González, «Mejora de la movilidad del crudo parafínico mediante campos magnéticos», Tesis de pregrado, Esc. de Ing. Elec, Electrónica y Tele, Fac. Ing. Fisicomecánicas, Univ. Ind. de Santander, Bucaramanga, Colombia. 2009.
- [7] J. Rey y J. Pinzón, «Estudio de la influencia de un campo eléctrico externo en la movilidad de crudos parafínicos», Tesis de pregrado, Esc. de Ing. Elec, Electrónica y Tele, Fac. Ing. Fisicomecánicas, Univ. Ind. de Santander, Bucaramanga, Colombia. 2013.
- [8] E. Ariza, «Determinación del umbral de cristalización de las parafinas en el crudo del Campo Escuela Colorado», Tesis de maestría, Esc. de Ing. de Petróleos, Fac. de Ing. Fisicoquímicas, Univ. Ind. de Santander, Bucaramanga, Colombia. 2008.
- [9] P. Benjumea, J. Agudelo y L. Ríos, «Propiedades del flujo a baja temperatura del biodiesel de aceite de palma», Rev. Fac. de Ing. Univ. de Antioquia, No. 42, Medellín, Colombia, Mayo 2007.
- [10] R. Tao y X. Xu, «Reducing the viscosity of crude oil by pulsed electric or magnetic field», Energy & Fuels, 2006.
- [11] R. Tao, «The physical mechanism to reduce viscosity of liquid suspensions», Inter. Jour. of Mod. Physics, B, Vol. 21, Nos. 28 & 29. Philadelphia, USA, 2007.
- [12] R. Tao, «Final report: Reducing the viscosity of crude oil by pulsed electric or magnetic field», Dep. of Physics, Tem. Univ. Philadelphia, Philadelphia, USA, 2008.
- [13] S. Less, A. Hannisdal y J. Sjöblom, «An electrorheological study on the behavior of water in crude oil emulsions under influence of a DC electric field and different flow conditions», Jour. of Disp. Scien. and Technology, Sep, 2008.
- [14] I. Evdokimov y K. Kornishin, «Apparent disaggregation of colloids in a magnetically treated crude oil», Energy & Fuels. Moscow, Russia, 2009.
- [15] J. Zhang, F. Chen y N. Zhang, «The electrorheological effect study of crude oil under the applied electric field». Phy. and Num. Sim. of Geot. Engineering, 2nd ISSUE, China, 2011.
- [16] H. Tang, K. Huang y R. Tao, «Electrorheology improves transportation of crude oil», Jour. of Int. Mat. Sys. and Structures. Philadelphia, USA, 2011.
- [17] C. Jiménez, «Diseño y construcción de un prototipo de herramienta magnética para inhibir las precipitaciones de parafina de Campo Escuela Colorado». Tesis de maestría, Esc. de Ing. Elec, Electrónica y Tele, Fac. Ing. Fisicomecánicas, Univ. Ind. de Santander, Bucaramanga, Colombia. 2013.
- [18] Y. Briceño y J. Diaz, «Diseño y construcción del prototipo de una herramienta magnética para tratamiento a muestras de crudo del campo escuela colorado», Tesis de pregrado, Esc. de Ing. Elec, Electrónica y Tele, Fac. Ing. Fisicomecánicas, Univ. Ind. de Santander, Bucaramanga, Colombia. 2013.
- [19] H. Hugh, R. Freedman, A. Ford, «Capacitancia y Dieléctricos» en *Sears-Zemansky Física universitaria con física moderna*, vol. 2. 12ma ed., D.F., Méx., Pers. Education, 2009, pp. 815-845.
- [20] D. Cheng, «Campos Eléctricos Estáticos» en *Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería*, 1ra ed., Naucalpan, Méx., 1998. pp. 72-143.

- [21] Á. Ortiz y S. Riberos, «Estudio de la influencia del agua en la movilidad de crudos parafínicos bajo el efecto de un campo eléctrico externo», Tesis de grado, Esc. de Ing. Química, Univ. Ind. de Santander, Bucaramanga, 2012.
- [22] Plásticos de ingeniería Tecnoquim S.A. de C.V., «POLYTEC UHMW Características Técnicas».
- [23] High voltage power supply Leybold Didactic GmbH «High voltage power supply 10 kV». LD-Didactic 521 70.
- [24] D. Cristancho y J. Hoyos, «Procedimiento de metodológicos para la caracterización de fluidos de campos maduros. Aplicación a los fluidos del Campo Colorado», Tesis de Grado, Esc. de Ing. de Petroleos, Univ. Ind. de Santander, Bucaramanga, Colombia. 2008.
- [25] Leybold Didactic «Kirchhoff's voltage balance: Measuring the force between two charged plates of a plate» en *Electricity - Electrostatics - Effects of force in an electric field*, LD Physics Leaflets O3.1.4.2
- [26] Leybold Didactic GmbH «Universal measuring instrument physics». LD-Didactic 531 835.
- [27] Leybold Didactic GmbH «Force sensor S, $\pm 1\text{N}$ ». LD-Didactic 524 060.
- [28] D. Meeker, «FEMM 4.2 Electrostatics Tutorial», Jun. 25, 2006, (www.femm.info/Archives/doc/tutotial-electrostatics.pdf)
- [29] S. Serway y J.W. Jewett (Jr), «Electricidad y Magnetismo» en *Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna*, vol. 2, 7ma ed., D.F., Méx., Cengage L., 2008, pp. 641-976.
- [30] S. Serway y J.W. Jewett (Jr), «Introducción a la física» en *Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna*, vol. 2, 7ma ed., D.F., Méx., Cengage L., 2008, pp. 1153-11.

Bibliografía

- Á. Ortiz y S. Riberos, «Estudio de la influencia del agua en la movilidad de crudos parafínicos bajo el efecto de un campo eléctrico externo», Tesis de grado, Esc. de Ing. Química, Univ. Ind. de Santander, Bucaramanga, 2012.
- C. Jiménez, «Diseño y construcción de un prototipo de herramienta magnética para inhibir las precipitaciones de parafina de Campo Escuela Colorado». Tesis de maestría, Esc. de Ing. Elec, Electrónica y Tele, Fac. Ing. Fisicomecánicas, Univ. Ind. de Santander, Bucaramanga, Colombia. 2013.
- C. Villabona y D. González, «Mejora de la movilidad del crudo parafínico mediante campos magnéticos», Tesis de pregrado, Esc. de Ing. Elec, Electrónica y Tele, Fac. Ing. Fisicomecánicas, Univ. Ind. de Santander, Bucaramanga, Colombia. 2009.
- D. Cheng, «Campos Eléctricos Estáticos» en *Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería*, 1ra ed., Naucalpan, Méx., 1998. pp. 72-143.
- D. Cristancho y J. Hoyos, «Procedimiento de metodológicos para la caracterización de fluidos de campos maduros. Aplicación a los fluidos del Campo Colorado», Tesis de Grado, Esc. de Ing. de Petroleos, Univ. Ind. de Santander, Bucaramanga, Colombia. 2008.
- D. Meeker, «FEMM 4.2 Electrostatics Tutorial», Jun. 25, 2006, (www.femm.info/Archives/doc/tutotial-electrostatics.pdf)
- E. Ariza, «Determinación del umbral de cristalización de las parafinas en el crudo del Campo Escuela Colorado», Tesis de maestría, Esc. de Ing. de Petróleos, Fac. de Ing. Fisicoquímicas, Univ. Ind. de Santander, Bucaramanga, Colombia. 2008.
- H. Hugh, R. Freedman, A. Ford, «Capacitancia y Dieléctricos» en *Sears-Zemansky Física universitaria con física moderna*, vol. 2. 12ma ed., D.F., Méx., Pers. Education, 2009, pp. 815-845.

- H. Tang, K. Huang y R. Tao, «Electrorheology improves transportation of crude oil», Jour. of Int. Mat. Sys. and Structures. Philadelphia, USA, 2011.
- High** voltage power supply Leybold Didactic GmbH «High voltage power supply 10 kV». LD-Didactic 521 70.
- I. Evdokimov y K. Kornishin, «Apparent disaggregation of colloids in a magnetically treated crude oil», Energy & Fuels. Moscow, Russia, 2009.
- J. Rey y J. Pinzón, «Estudio de la influencia de un campo eléctrico externo en la movilidad de crudos parafínicos», Tesis de pregrado, Esc. de Ing. Elec, Electrónica y Tele, Fac. Ing. Fisicomecánicas, Univ. Ind. de Santander, Bucaramanga, Colombia. 2013.
- J. Smith, «Field mice: Extracting hand geometry from electric field measurements», IBM Sys. Journal, vol. 35, no. 3-4, 1996, pp. 587-608.
- J. Stanley y C. White «Electric field sensing air bag danger zone sensor», U.S. Patent 5964478, Oct.12, 1999.
- J. Zhang, F. Chen y N. Zhang, «The electrorheological effect study of crude oil under the applied electric field». Phy. and Num. Sim. of Geot. Engineering, 2nd ISSUE, China, 2011.
- Leybold** Didactic «Kirchhoff's voltage balance: Measuring the force between two charged plates of a plate» en *Electricity - Electrostatics - Effects of force in an electric field*, LD Physics Leaflets O3.1.4.2
- Leybold** Didactic GmbH «Force sensor S, $\pm 1\text{N}$ ». LD-Didactic 524 060.
- Leybold** Didactic GmbH «Universal measuring instrument physics». LD-Didactic 531 835.
- P. Benjumea, J. Agudelo y L. Ríos, «Propiedades del flujo a baja temperatura del biodiesel de aceite de palma», Rev. Fac. de Ing, Univ. de Antioquia, No. 42, Medellín, Colombia, Mayo 2007.
- Plásticos** de ingeniería Tecnoquim S.A. de C.V., «POLYTEC UHMW Características Técnicas».
- R. Correa, J. Peña, O. Reyes, «Detector prototipo basado en un campo eléctrico», Rev. Ingenierías, Univ. de Medellín, vol. 8, núm 15, jul-dic, 2009, pp. 115-128. Medellín, Colombia.
- R. Tao, «Final report: Reducing the viscosity of crude oil by pulsed electric or magnetic field», Dep. of Physics, Tem. Univ. Philadelphia, Philadelphia, USA, 2008.
- R. Tao, K. Huang, H. Tang, y D. Bell. «Electrorheology leads to efficient combustion». Energy & Fuels, vol. 22, Ago. 2008, Dep. of Physics, Temple Univ., Phil., Pennsylvania, pp. 3785-3788.
- R. Tao, «The physical mechanism to reduce viscosity of liquid suspensions», Inter. Jour. of Mod. Physics, B, Vol. 21, Nos. 28 & 29. Philadelphia, USA, 2007.
- R. Tao y X. Xu, «Reducing the viscosity of crude oil by pulsed electric or magnetic field», Energy & Fuels, 2006.
- S. Less, A. Hannisdal y J. Sjöblom, «An electrorheological study on the behavior of water in crude oil emulsions under influence of a DC electric field and different flow conditions», Jour. of Disp. Scien. and Technology, Sep, 2008.
- S. Marfisi, G. Álvarez, E. Paruta, P. Moreno, R. Antón y J-L. Salager, «Deshidratador electrostático de laboratorio para probar formulaciones desemulsionantes». Agosto 2009.
- S. Serway y J.W. Jewett (Jr), «Electricidad y Magnetismo» en *Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna*, vol. 2, 7ma ed., D.F., Méx., Cengage L., 2008, pp. 641-976.
- S. Serway y J.W. Jewett (Jr), «Introducción a la física» en *Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna*, vol. 2, 7ma ed., D.F., Méx., Cengage L., 2008, pp. 1153-11.
- Y. Briceño y J. Diaz, «Diseño y construcción del prototipo de una herramienta magnética para tratamiento a muestras de crudo del campo escuela colorado», Tesis de pregrado, Esc. de Ing. Elec, Electrónica y Tele, Fac. Ing. Fisicomecánicas, Univ. Ind. de Santander, Bucaramanga, Colombia. 2013.

A. Datos obtenidos a partir de montaje experimental (sección 4) simulación numérica computacional (sección 5) para cada d_j .

Para $d = 0,5 \text{ mm}$: $\epsilon_{r_j} = 0,99$

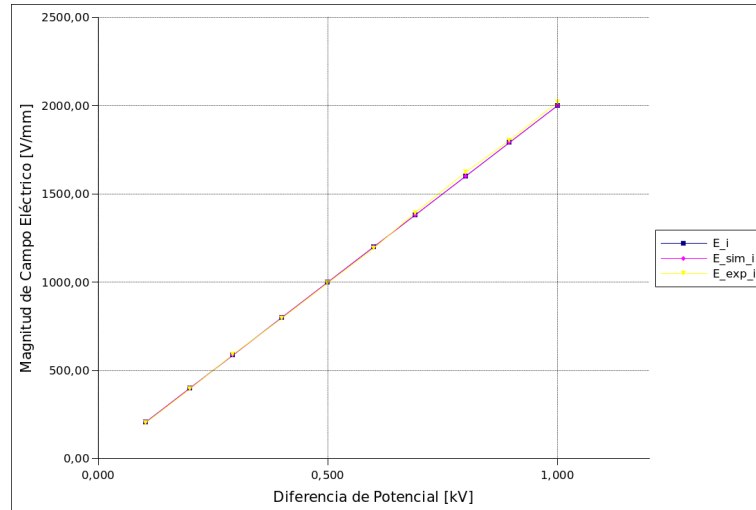


Figura A.1: Gráfica de las magnitudes de campo electrostático E_i , E_{sim_i} y E_{exp_i} , vs diferencia de potencial U_i para $d = 0,5 \text{ mm}$: $E_i = E_i$; $E_{sim_i} = E_{sim_i}$; $E_{exp_i} = E_{exp_i}$.

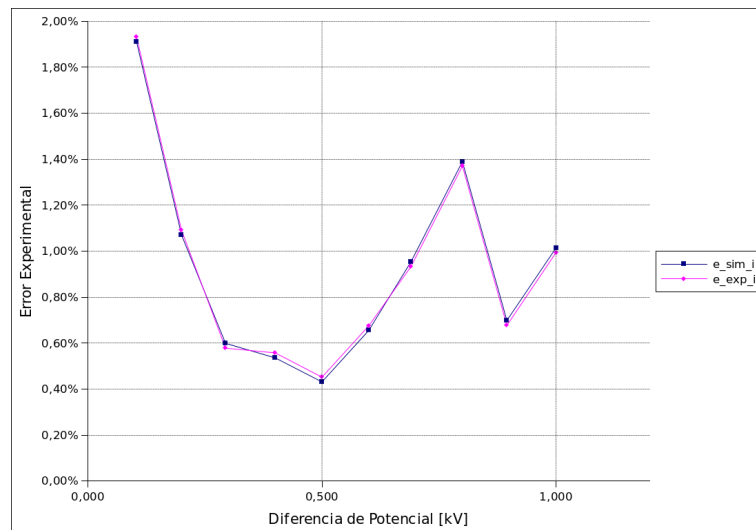


Figura A.2: Errores de simulación (e_{sim_i}) y experimentales (e_{exp_i}), vs diferencia de potencial entre placas U_i para $d = 0,5 \text{ mm}$: $e_{sim_i} = e_{sim_i}$; $e_{exp_i} = e_{exp_i}$.

Tabla 5: Tabla de datos para $d = 0,5 \text{ mm}$.

U_i [kV]	I_i [μA]	F_i [mN]	ε_i [$\frac{\text{F}}{\text{m}}$]	E_i [$\frac{\text{V}}{\text{mm}}$]	E_{sim_i} [$\frac{\text{V}}{\text{mm}}$]	e_{sim_i}	E_{exp_i} [$\frac{\text{V}}{\text{mm}}$]	e_{exp_i}
0,104	9	0,25	5,89E-12	208,00	207,96	0,02 %	204,06	1,90 %
0,200	17	0,94	5,98E-12	400,00	399,92	0,02 %	395,68	1,08 %
0,294	25	2,10	6,19E-12	588,00	587,88	0,02 %	591,42	0,58 %
0,400	34	3,80	6,05E-12	800,00	799,83	0,02 %	795,57	0,55 %
0,500	43	5,95	6,06E-12	1000,00	999,79	0,02 %	995,50	0,45 %
0,600	53	8,53	6,03E-12	1200,00	1199,76	0,02 %	1191,95	0,67 %
0,690	63	11,65	6,23E-12	1380,00	1379,71	0,02 %	1392,99	0,94 %
0,800	76	15,80	6,29E-12	1600,00	1599,69	0,02 %	1622,23	1,39 %
0,895	87	19,50	6,20E-12	1790,00	1789,61	0,02 %	1802,19	0,68 %
1,000	100	24,50	6,24E-12	2000,00	1999,59	0,02 %	2020,07	1,00 %

Corto Circuito

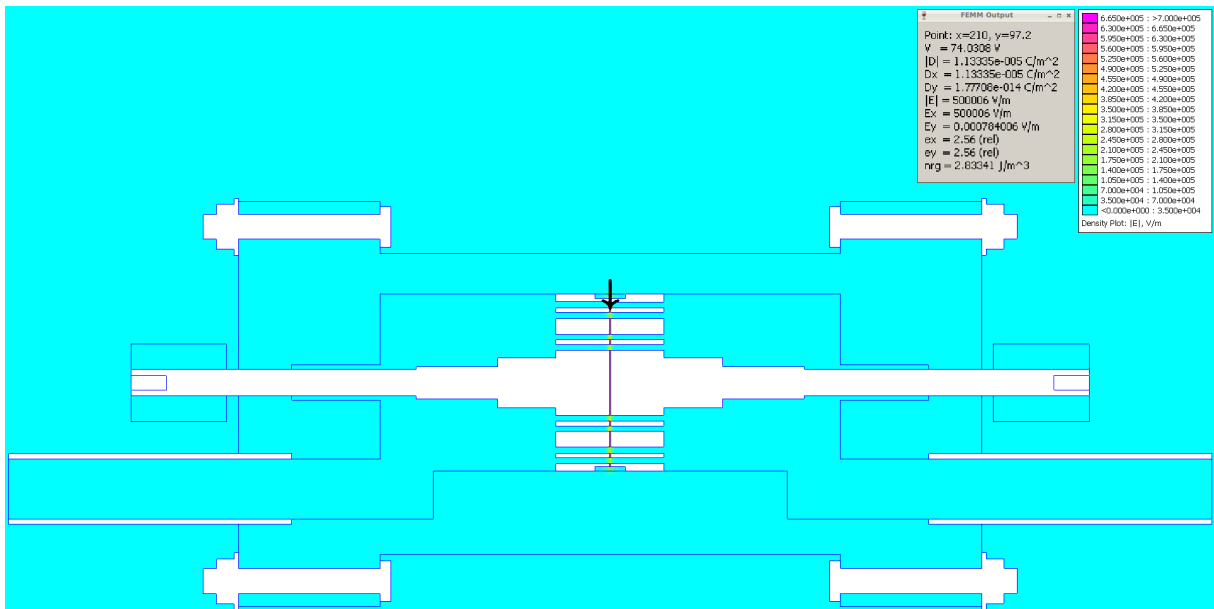


Figura A.3: Imagen de la estimación numérica de la disposición geométrica del campo electrostático para $d = 0,5 \text{ mm}$. La flecha indica el lugar donde se tomó la intensidad de campo electrostático E_{sim} .

Para $d = 1 \text{ mm}$: $\varepsilon_{r_j} = 2,10$

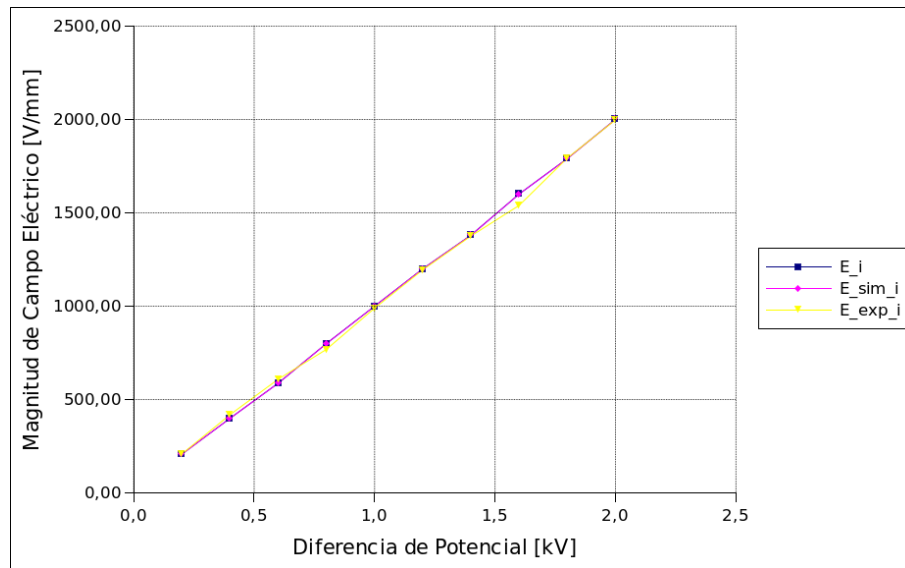


Figura A.4: Gráfica de las magnitudes de campo electrostático E_i , E_{sim_i} y E_{exp_i} , vs diferencia de potencial U_i para $d = 1 \text{ mm}$: $E_i = E_i$; $E_{sim_i} = E_{sim_i}$; $E_{exp_i} = E_{exp_i}$.

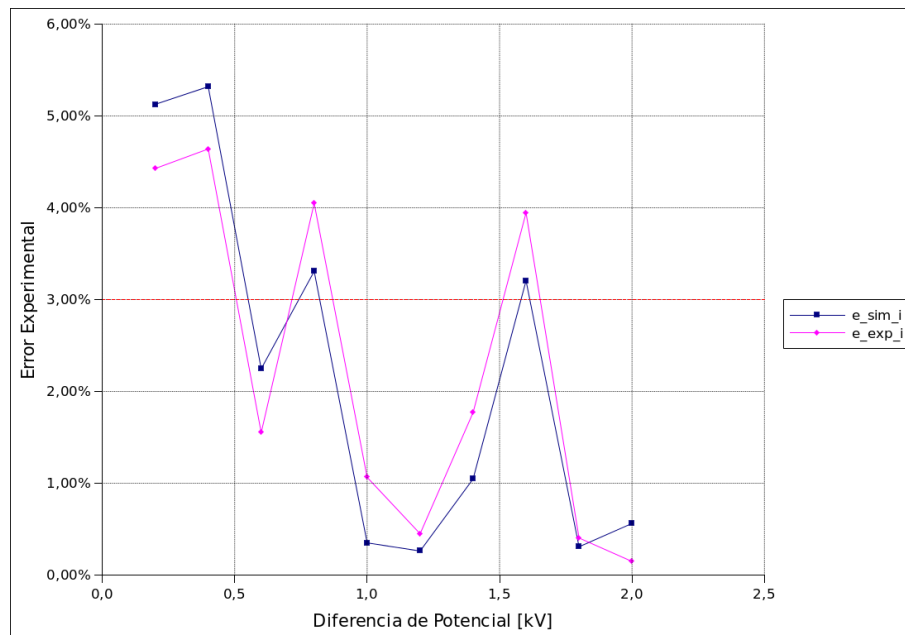


Figura A.5: Errores de simulación (e_{sim_i}) y experimentales (e_{exp_i}), vs diferencia de potencial entre placas U_i para $d = 1 \text{ mm}$: $e_{sim_i} = e_{sim_i}$; $e_{exp_i} = e_{exp_i}$.

Tabla 6: Tabla de datos para $d = 1\text{ mm}$.

U_i [kV]	I_i [μA]	F_i [mN]	ε_i [$\frac{F}{m}$]	E_i [$\frac{V}{mm}$]	E_{sim_i} [$\frac{V}{mm}$]	e_{sim_i}	E_{exp_i} [$\frac{V}{mm}$]	e_{exp_i}
0,2	16	0,56	2,04E-11	200,00	198,54	0,73 %	209,26	4,63 %
0,4	33	2,25	2,05E-11	400,00	397,16	0,71 %	419,46	4,86 %
0,6	47	4,75	1,92E-11	600,00	595,77	0,71 %	609,46	1,58 %
0,8	58	7,56	1,72E-11	800,00	794,31	0,71 %	768,88	3,89 %
1,0	75	12,52	1,82E-11	1000,00	992,95	0,71 %	989,46	1,05 %
1,2	92	18,25	1,84E-11	1200,00	1191,47	0,71 %	1194,62	0,45 %
1,4	110	24,20	1,80E-11	1400,00	1390,05	0,71 %	1375,64	1,74 %
1,6	125	30,30	1,72E-11	1600,00	1588,62	0,71 %	1539,28	3,79 %
1,8	148	41,10	1,85E-11	1800,00	1787,20	0,71 %	1792,74	0,40 %
2,0	167	51,00	1,86E-11	2000,00	1985,78	0,71 %	1997,02	0,15 %
Corto Circuito								

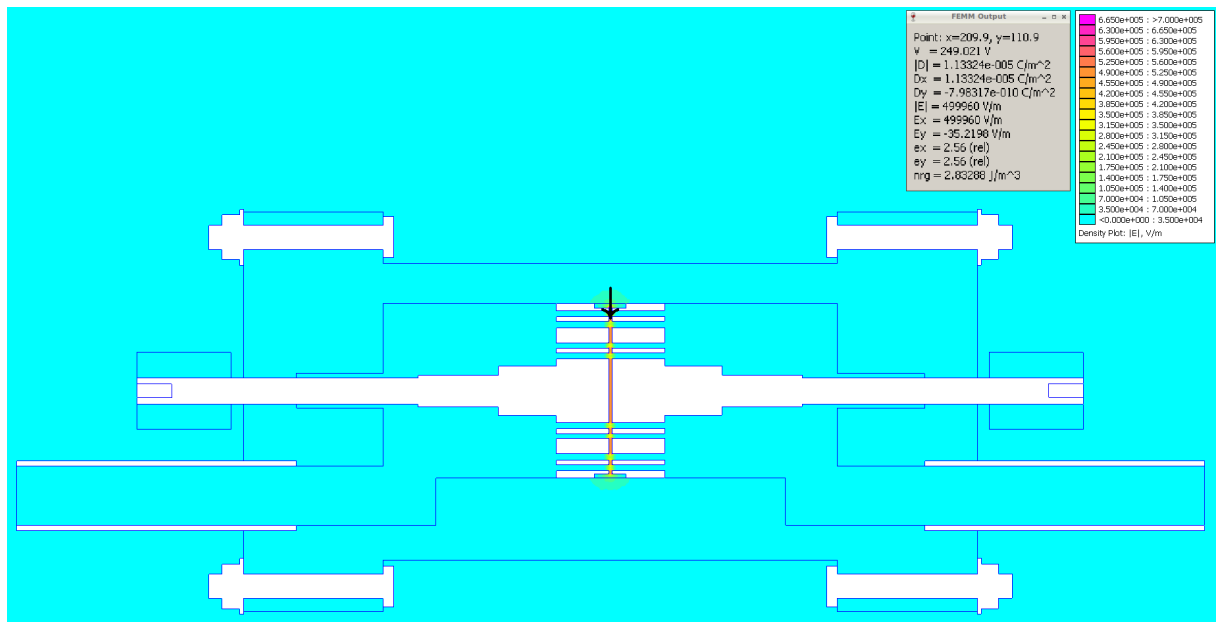


Figura A.6: Imagen de la estimación numérica de la disposición geométrica del campo electrostático para $d = 1\text{ mm}$. La flecha indica el lugar donde se tomó la intensidad de campo electrostático E_{sim} .

Para $d = 2\text{ mm}$: $\varepsilon_{r_j} = 2,20$

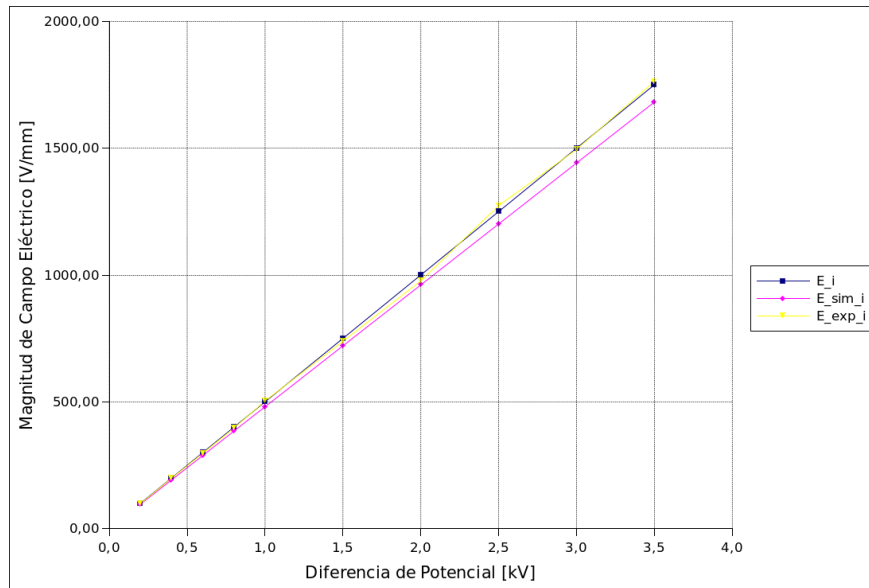


Figura A.7: Gráfica de las magnitudes de campo electrostático E_i , E_{sim_i} y E_{exp_i} , vs diferencia de potencial U_i para $d = 2\text{ mm}$: $E_i = E_i$; $E_sim_i = E_{sim_i}$; $E_exp_i = E_{exp_i}$.

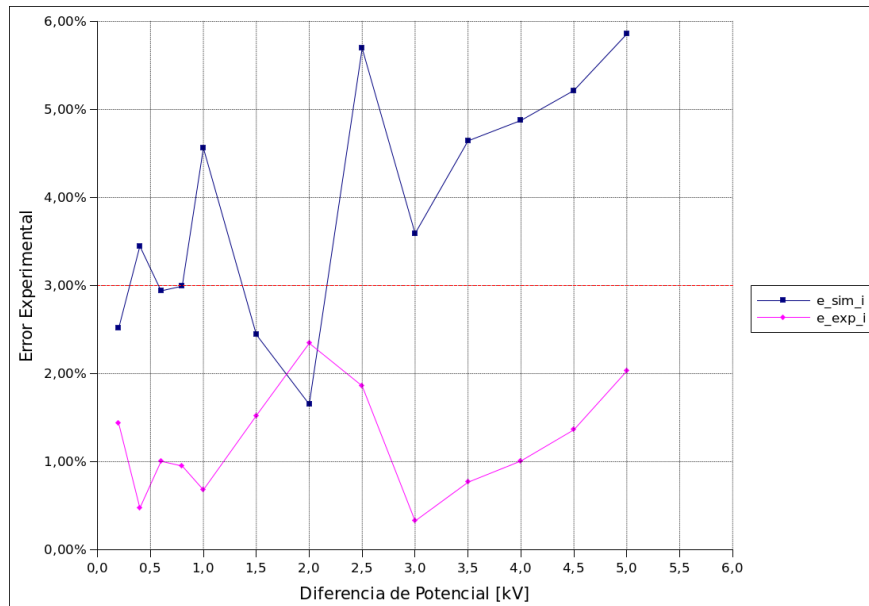


Figura A.8: Errores de simulación (e_{sim_i}) y experimentales (e_{exp_i}), vs diferencia de potencial entre placas U_i para $d = 2\text{ mm}$: $e_sim_i = e_{sim_i}$; $e_exp_i = e_{exp_i}$.

Tabla 7: Tabla de datos para $d = 2\text{ mm}$.

U_i [kV]	I_i [μA]	F_i [mN]	ε_i [$\frac{F}{m}$]	E_i [$\frac{V}{mm}$]	E_{sim_i} [$\frac{V}{mm}$]	e_{sim_i}	E_{exp_i} [$\frac{V}{mm}$]	e_{exp_i}
0,2	11	0,13	1,89E-11	100,00	96,10	3,90 %	98,58	1,42 %
0,4	18	0,53	1,93E-11	200,00	192,19	3,90 %	199,06	0,47 %
0,6	26	1,18	1,91E-11	300,00	288,28	3,91 %	297,01	1,00 %
0,8	34	2,10	1,91E-11	400,00	384,37	3,91 %	396,23	0,94 %
1,0	43	3,39	1,97E-11	500,00	480,46	3,91 %	503,43	0,69 %
1,5	64	7,30	1,89E-11	750,00	720,70	3,91 %	738,75	1,50 %
2,0	89	12,77	1,86E-11	1000,00	960,94	3,91 %	977,08	2,29 %
2,5	119	21,70	2,02E-11	1250,00	1201,18	3,91 %	1273,70	1,90 %
3,0	143	29,90	1,93E-11	1500,00	1441,42	3,91 %	1495,11	0,33 %
3,5	171	41,60	1,98E-11	1750,00	1681,66	3,91 %	1763,53	0,77 %
4,0	200	54,60	1,99E-11	2000,00	1921,90	3,90 %	2020,38	1,02 %
4,5	227	69,60	2,00E-11	2250,00	2162,14	3,90 %	2281,08	1,38 %
5,0	253	87,10	2,03E-11	2500,00	2402,38	3,90 %	2551,79	2,07 %

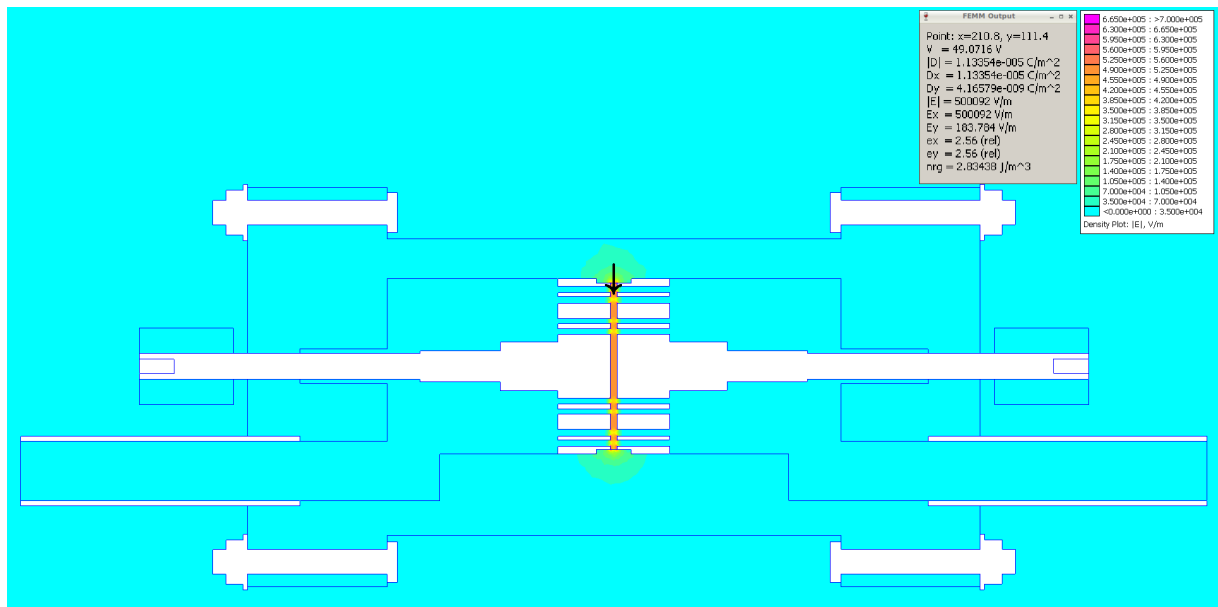


Figura A.9: Imagen de la estimación numérica de la disposición geométrica del campo electrostático para $d = 2\text{ mm}$. La flecha indica el lugar donde se tomó la intensidad de campo electrostático E_{sim} .

Para $d = 3 \text{ mm}$: $\varepsilon_{r_j} = 2,31$

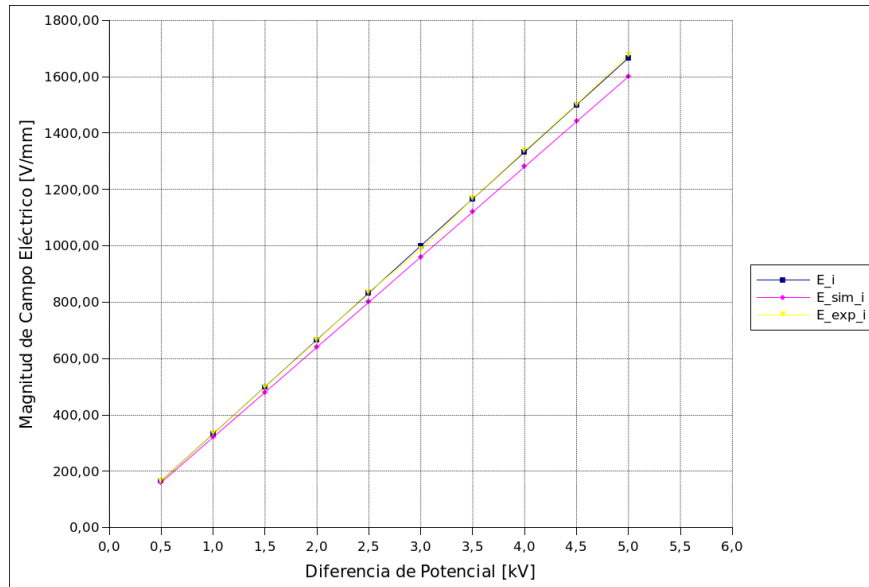


Figura A.10: Gráfica de las magnitudes de campo electrostático E_i , E_{sim_i} y E_{exp_i} , vs diferencia de potencial U_i para $d = 3 \text{ mm}$: $E_i = E_i$; $E_{sim_i} = E_{sim_i}$; $E_{exp_i} = E_{exp_i}$.

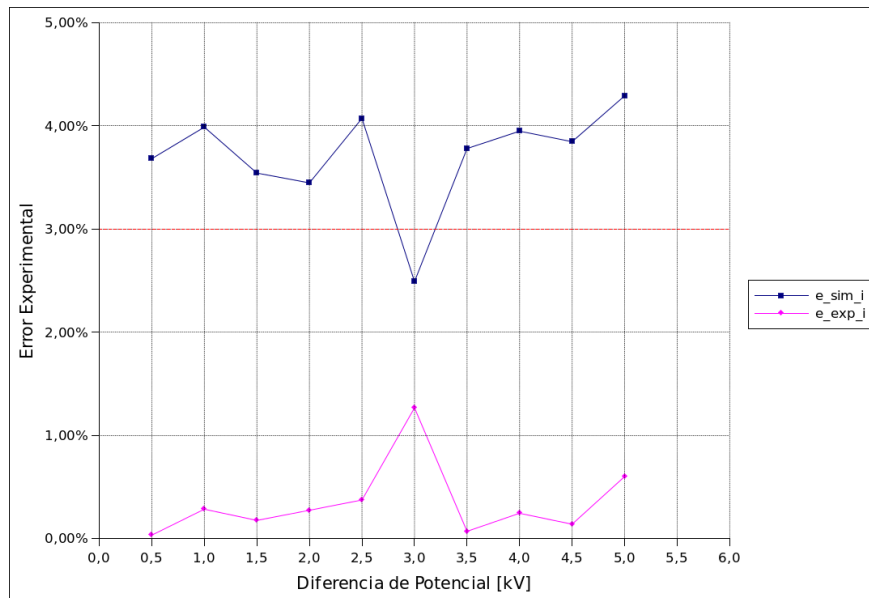


Figura A.11: Errores de simulación (e_{sim_i}) y experimentales (e_{exp_i}), vs diferencia de potencial entre placas U_i para $d = 3 \text{ mm}$: $e_{sim_i} = e_{sim_i}$; $e_{exp_i} = e_{exp_i}$.

Tabla 8: Tabla de datos para $d = 3 \text{ mm}$.

U_i	I_i	F_i	ε_i	E_i	E_{sim_i}	e_{sim_i}	E_{exp_i}	e_{exp_i}
[kV]	[μA]	[mN]	[$\frac{F}{m}$]	[$\frac{V}{mm}$]	[$\frac{V}{mm}$]		[$\frac{V}{mm}$]	
0,5	16	0,39	2,04E-11	166,67	160,48	3,71 %	166,61	0,03 %
1,0	32	1,57	2,06E-11	333,33	320,96	3,71 %	334,29	0,29 %
1,5	51	3,50	2,04E-11	500,00	481,44	3,71 %	499,12	0,18 %
2,0	64	6,21	2,03E-11	666,67	641,92	3,71 %	664,84	0,27 %
2,5	81	9,83	2,06E-11	833,33	802,40	3,71 %	836,46	0,38 %
3,0	98	13,70	1,99E-11	1000,00	962,89	3,71 %	987,48	1,25 %
3,5	116	19,15	2,05E-11	1166,67	1123,37	3,71 %	1167,49	0,07 %
4,0	135	25,10	2,05E-11	1333,33	1283,85	3,71 %	1336,62	0,25 %
4,5	153	31,70	2,05E-11	1500,00	1444,33	3,71 %	1502,10	0,14 %
5,0	172	39,50	2,07E-11	1666,67	1604,82	3,71 %	1676,75	0,61 %

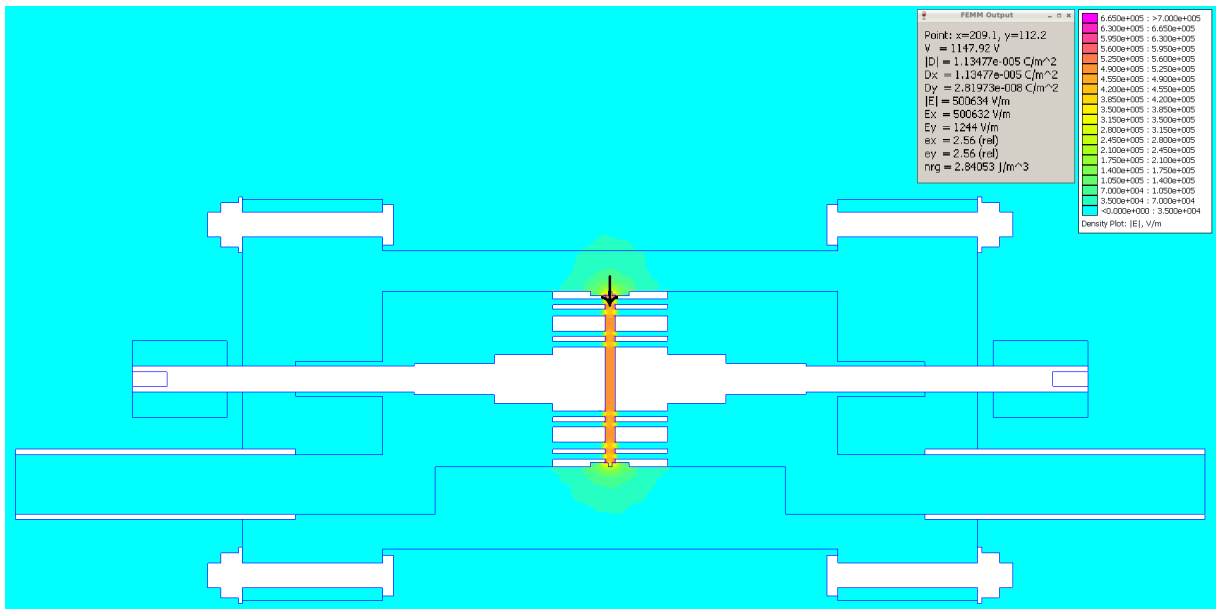


Figura A.12: Imagen de la estimación numérica de la disposición geométrica del campo electrostático para $d = 3 \text{ mm}$. La flecha indica el lugar donde se tomó la intensidad de campo electrostático E_{sim} .

Para $d = 4 \text{ mm}$: $\varepsilon_{r_j} = 2,24$

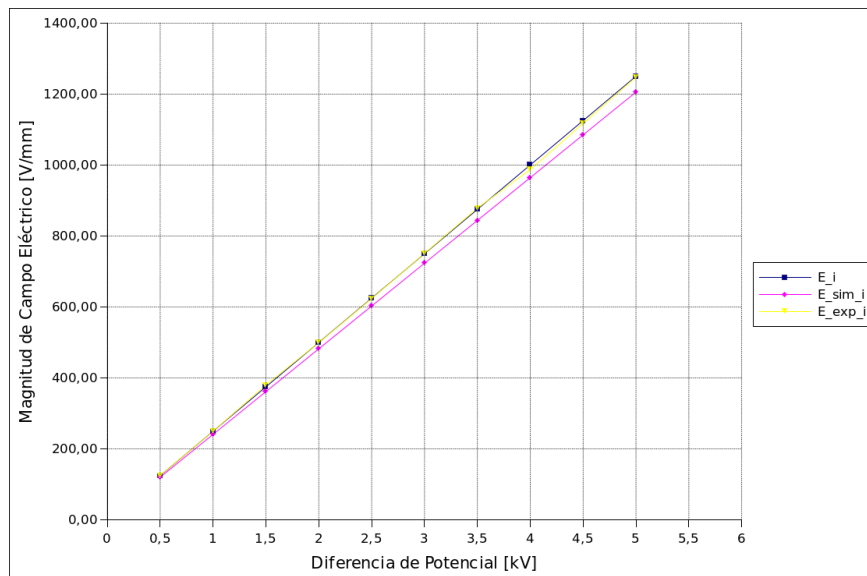


Figura A.13: Gráfica de las magnitudes de campo electrostático E_i , E_{sim_i} y E_{exp_i} , vs diferencia de potencial U_i para $d = 4 \text{ mm}$: $E_i = E_i$; $E_{sim_i} = E_{sim_i}$; $E_{exp_i} = E_{exp_i}$.

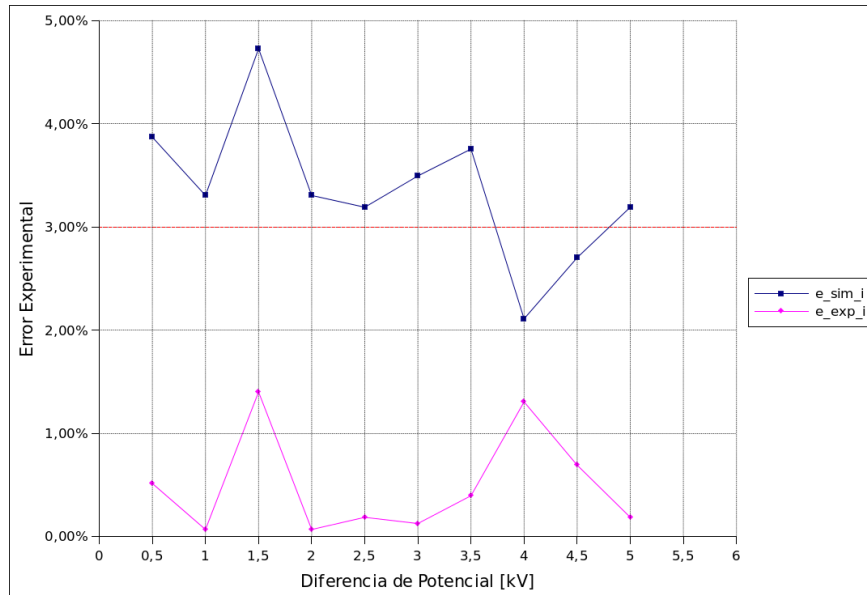


Figura A.14: Errores de simulación (e_{sim_i}) y experimentales (e_{exp_i}), vs diferencia de potencial entre placas U_i para $d = 4 \text{ mm}$: $e_{sim_i} = e_{sim_i}$; $e_{exp_i} = e_{exp_i}$.

Tabla 9: Tabla de datos para $d = 4 \text{ mm}$.

U_i [kV]	I_i [μA]	F_i [mN]	ε_i [$\frac{\text{F}}{\text{m}}$]	E_i [$\frac{\text{V}}{\text{mm}}$]	E_{sim_i} [$\frac{\text{V}}{\text{mm}}$]	e_{sim_i}	E_{exp_i} [$\frac{\text{V}}{\text{mm}}$]	e_{exp_i}
0,5	13	0,215	2,00E-11	125,00	120,784	3,37 %	125,65	0,52 %
1	26	0,85	1,98E-11	250,00	241,569	3,37 %	249,83	0,07 %
1,5	38	1,97	2,04E-11	375,00	362,354	3,37 %	380,33	1,42 %
2	50	3,4	1,98E-11	500,00	483,139	3,37 %	499,66	0,07 %
2,5	62	5,3	1,97E-11	625,00	603,924	3,37 %	623,83	0,19 %
3	78	7,68	1,99E-11	750,00	724,709	3,37 %	750,95	0,13 %
3,5	90	10,51	2,00E-11	875,00	845,494	3,37 %	878,48	0,40 %
4	102	13,27	1,93E-11	1000,00	966,279	3,37 %	987,11	1,29 %
4,5	116	17	1,95E-11	1125,00	1087,064	3,37 %	1117,26	0,69 %
5	131	21,2	1,97E-11	1250,00	1207,849	3,37 %	1247,67	0,19 %

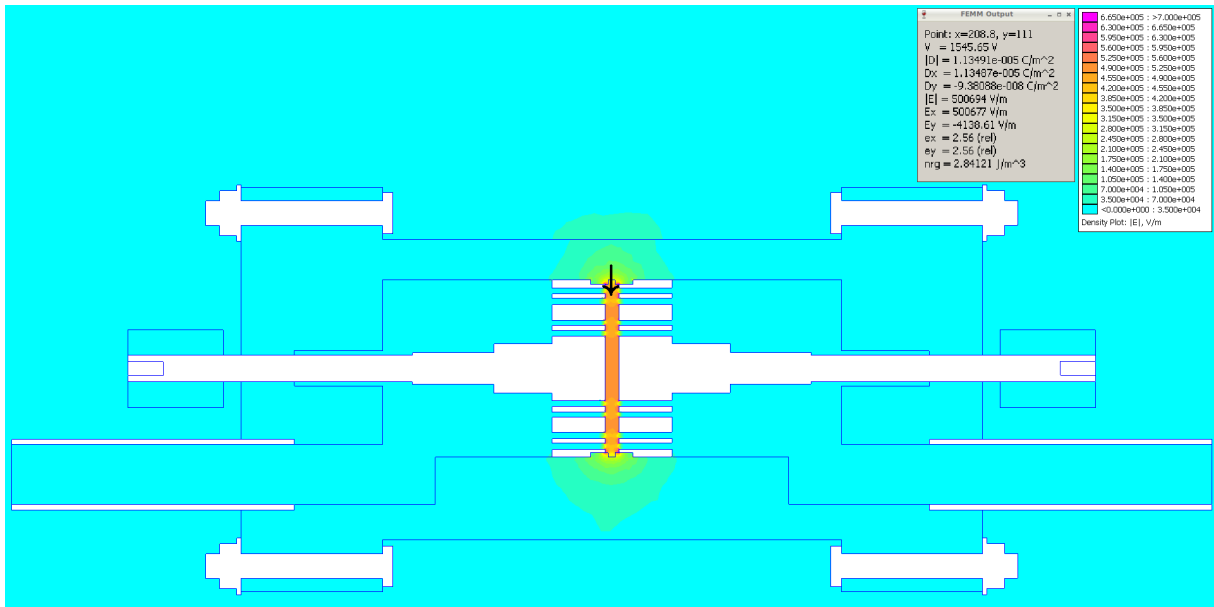


Figura A.15: Imagen de la estimación numérica de la disposición geométrica del campo electrostático para $d = 4 \text{ mm}$. La flecha indica el lugar donde se tomó la intensidad de campo electrostático E_{sim} .

Para $d = 5 \text{ mm}$: $\varepsilon_{r_j} = 2,331$

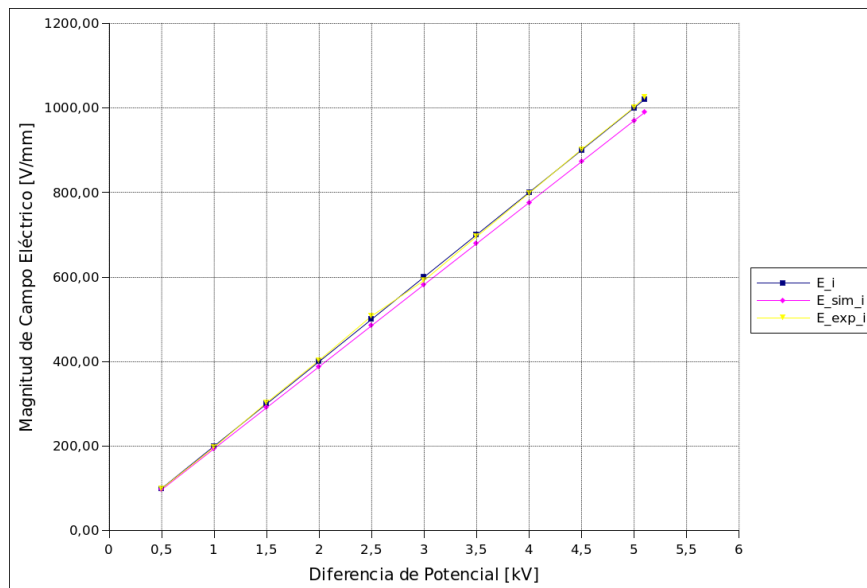


Figura A.16: Gráfica de las magnitudes de campo electrostático E_i , E_{sim_i} y E_{exp_i} , vs diferencia de potencial U_i para $d = 5 \text{ mm}$: $E_i = E_i$; $E_{sim_i} = E_{sim_i}$; $E_{exp_i} = E_{exp_i}$.

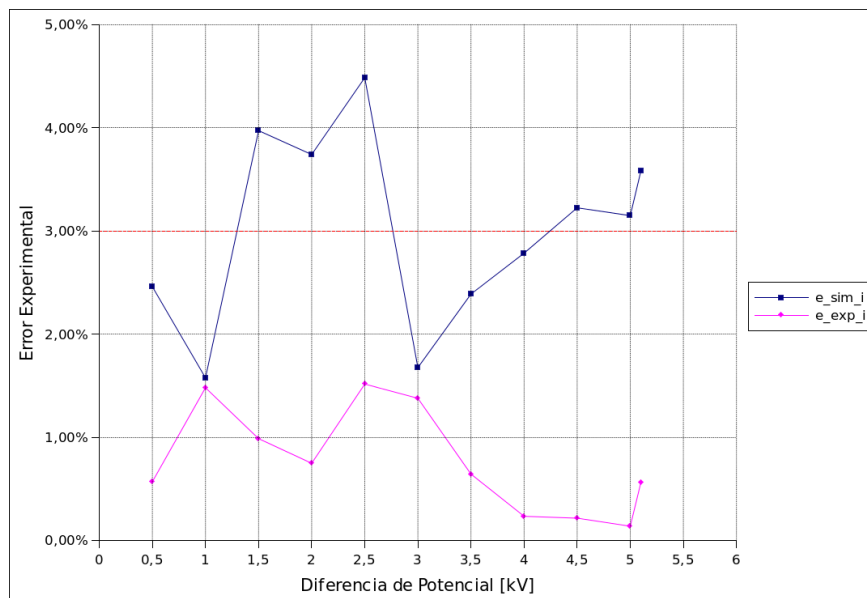


Figura A.17: Errores de simulación (e_{sim_i}) y experimentales (e_{exp_i}), vs diferencia de potencial entre placas U_i para $d = 5 \text{ mm}$: $e_{sim_i} = e_{sim_i}$; $e_{exp_i} = e_{exp_i}$.

Tabla 10: Tabla de datos para $d = 5 \text{ mm}$.

U_i [kV]	I_i [μA]	F_i [mN]	ε_i [$\frac{F}{m}$]	E_i [$\frac{V}{mm}$]	E_{sim_i} [$\frac{V}{mm}$]	e_{sim_i}	E_{exp_i} [$\frac{V}{mm}$]	e_{exp_i}
0,5	10	0,14	2,04E-11	100,00	96,986	3,01 %	99,43	0,57 %
1	21	0,55	2,00E-11	200,00	193,972	3,01 %	197,08	1,46 %
1,5	33	1,3	2,10E-11	300,00	290,958	3,01 %	302,99	1,00 %
2	44	2,3	2,09E-11	400,00	387,944	3,01 %	403,02	0,75 %
2,5	54	3,65	2,12E-11	500,00	484,93	3,01 %	507,70	1,54 %
3	64	4,96	2,00E-11	600,00	581,916	3,01 %	591,84	1,36 %
3,5	75	6,85	2,03E-11	700,00	678,902	3,01 %	695,52	0,64 %
4	87	9,02	2,05E-11	800,00	775,888	3,01 %	798,12	0,24 %
4,5	98	11,52	2,07E-11	900,00	872,874	3,01 %	901,96	0,22 %
5	111	14,2	2,07E-11	1000,00	969,86	3,01 %	1001,40	0,14 %
5,1	114	14,9	2,08E-11	1020,00	989,046	3,03 %	1025,78	0,57 %

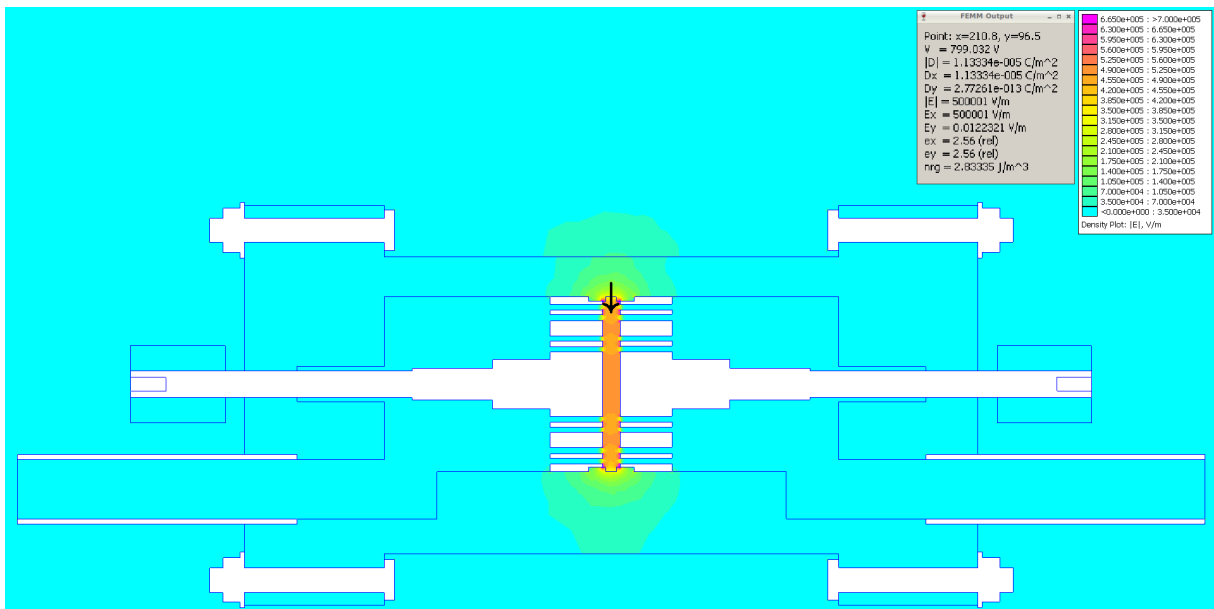


Figura A.18: Imagen de la estimación numérica de la disposición geométrica del campo electrostático para $d = 5 \text{ mm}$. La flecha indica el lugar donde se tomó la intensidad de campo electrostático E_{sim} .

Para $d = 6 \text{ mm}$: $\varepsilon_{r_j} = 2,37$

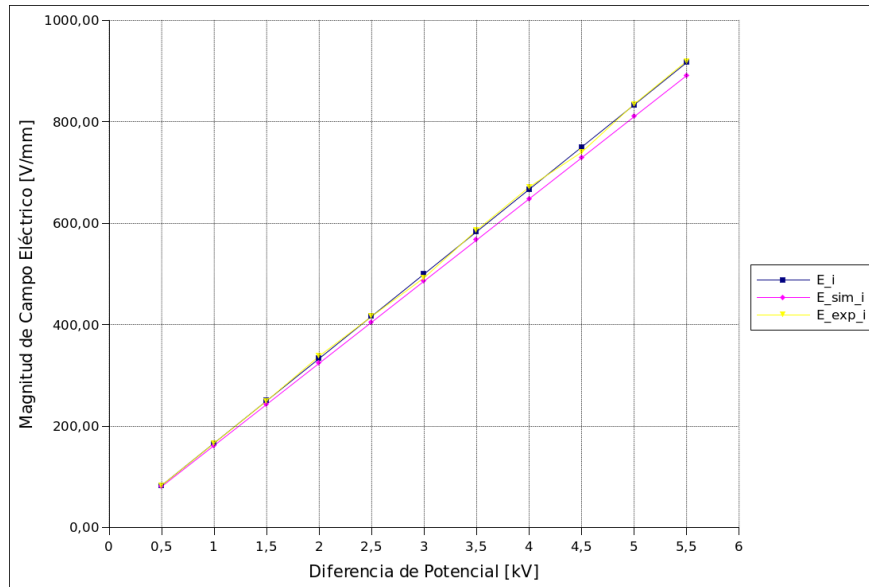


Figura A.19: Gráfica de las magnitudes de campo electrostático E_i , E_{sim_i} y E_{exp_i} , vs diferencia de potencial U_i para $d = 6 \text{ mm}$: $E_i = E_i$; $E_{sim_i} = E_{sim_i}$; $E_{exp_i} = E_{exp_i}$.

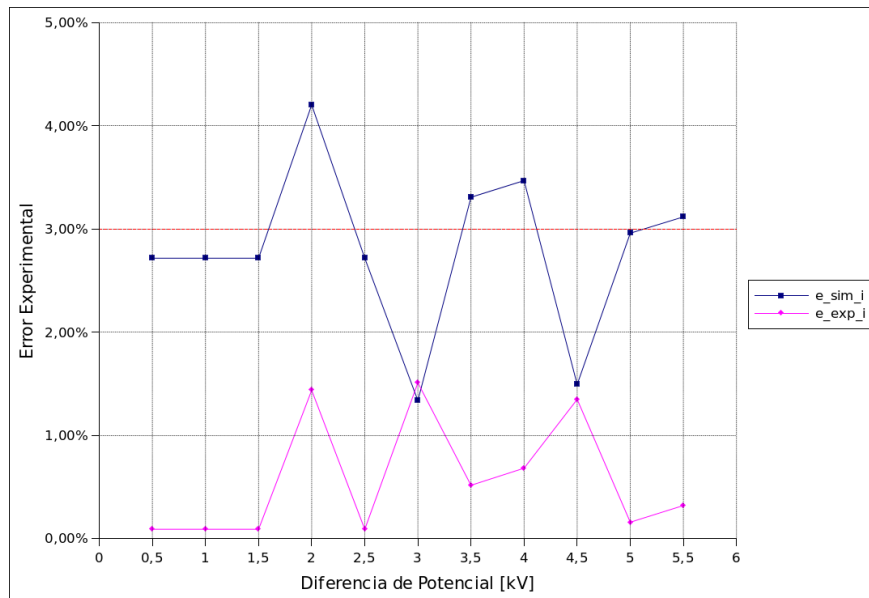


Figura A.20: Errores de simulación (e_{sim_i}) y experimentales (e_{exp_i}), vs diferencia de potencial entre placas U_i para $d = 6 \text{ mm}$: $e_{sim_i} = e_{sim_i}$; $e_{exp_i} = e_{exp_i}$.

Tabla 11: Tabla de datos para $d = 6 \text{ mm}$.

U_i	I_i	F_i	ε_i	E_i	E_{sim_i}	e_{sim_i}	E_{exp_i}	e_{exp_i}
[kV]	[μA]	[mN]	[$\frac{F}{m}$]	[$\frac{V}{mm}$]	[$\frac{V}{mm}$]		[$\frac{V}{mm}$]	
0,5	9	0,1	2,10E-11	83,33	80,995	2,81 %	83,26	0,09 %
1	19	0,4	2,10E-11	166,67	161,991	2,81 %	166,52	0,09 %
1,5	28	0,9	2,10E-11	250,00	242,987	2,81 %	249,77	0,09 %
2	38	1,65	2,16E-11	333,33	323,982	2,81 %	338,20	1,46 %
2,5	47	2,5	2,10E-11	416,67	404,978	2,81 %	416,29	0,09 %
3	55	3,5	2,04E-11	500,00	485,973	2,81 %	492,56	1,49 %
3,5	66	4,96	2,12E-11	583,33	566,969	2,81 %	586,36	0,52 %
4	76	6,5	2,13E-11	666,67	647,965	2,81 %	671,25	0,69 %
4,5	84	7,9	2,04E-11	750,00	728,960	2,81 %	740,01	1,33 %
5	96	10,05	2,11E-11	833,33	809,956	2,81 %	834,66	0,16 %
5,5	107	12,2	2,11E-11	916,67	890,951	2,81 %	919,61	0,32 %

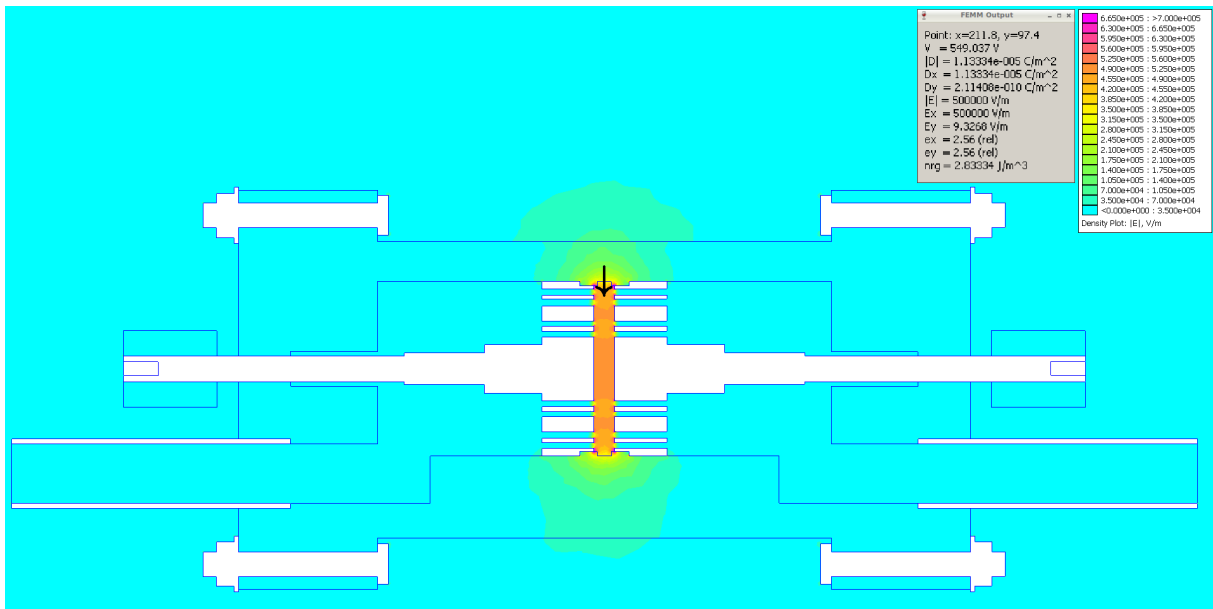


Figura A.21: Imagen de la estimación numérica de la disposición geométrica del campo electrostático para $d = 6 \text{ mm}$. La flecha indica el lugar donde se tomó la intensidad de campo electrostático E_{sim} .

Para $d = 8 \text{ mm}$: $\varepsilon_{r_j} = 2,42$

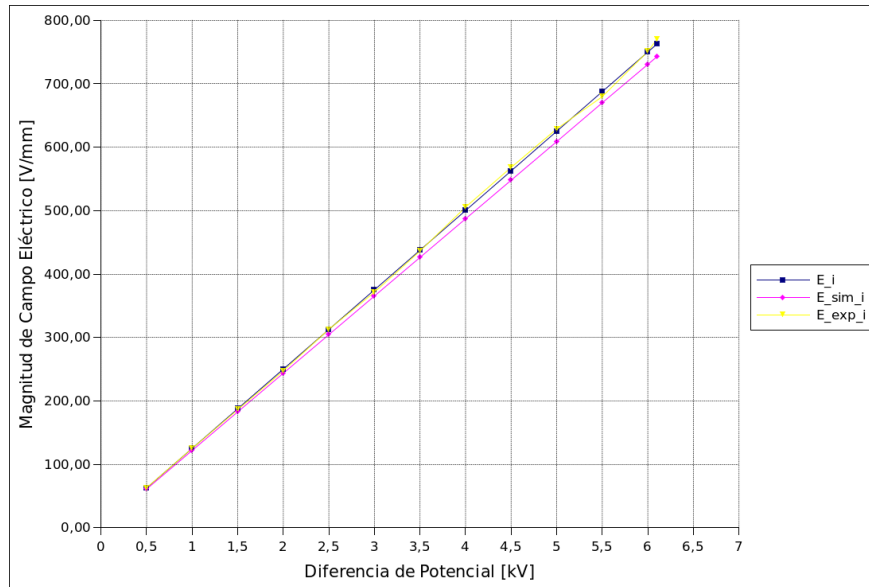


Figura A.22: Gráfica de las magnitudes de campo electrostático E_i , E_{sim_i} y E_{exp_i} , vs diferencia de potencial U_i para $d = 8 \text{ mm}$: $E_i = E_i$; $E_{sim_i} = E_{sim_i}$; $E_{exp_i} = E_{exp_i}$.

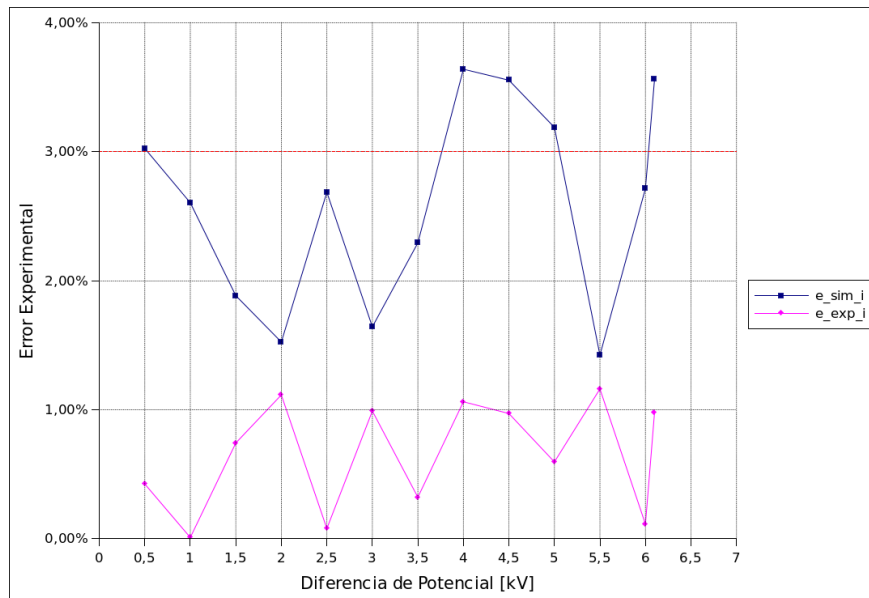


Figura A.23: Errores de simulación (e_{sim_i}) y experimentales (e_{exp_i}), vs diferencia de potencial entre placas U_i para $d = 8 \text{ mm}$: $e_{sim_i} = e_{sim_i}$; $e_{exp_i} = e_{exp_i}$.

Tabla 12: Tabla de datos para $d = 8\text{ mm}$.

U_i	I_i	F_i	ε_i	E_i	E_{sim_i}	e_{sim_i}	E_{exp_i}	e_{exp_i}
[kV]	[μA]	[mN]	[$\frac{F}{m}$]	[$\frac{V}{mm}$]	[$\frac{V}{mm}$]		[$\frac{V}{mm}$]	
0,5	7	0,058	2,16E-11	62,50	60,8674	2,61 %	62,77	0,43 %
1	14	0,23	2,14E-11	125,00	121,735	2,61 %	124,99	0,01 %
1,5	23	0,51	2,11E-11	187,50	182,615	2,61 %	186,12	0,74 %
2	30	0,9	2,10E-11	250,00	243,478	2,61 %	247,25	1,10 %
2,5	39	1,44	2,15E-11	312,50	304,347	2,61 %	312,74	0,08 %
3	46	2,03	2,10E-11	375,00	365,23	2,61 %	371,33	0,98 %
3,5	53	2,8	2,13E-11	437,50	426,101	2,61 %	436,10	0,32 %
4	62	3,76	2,19E-11	500,00	486,973	2,61 %	505,36	1,07 %
4,5	69	4,75	2,18E-11	562,50	547,825	2,61 %	568,01	0,98 %
5	77	5,82	2,17E-11	625,00	608,695	2,61 %	628,74	0,60 %
5,5	83	6,8	2,09E-11	687,50	669,946	2,55 %	679,61	1,15 %
6	91	8,3	2,15E-11	750,00	730,459	2,61 %	750,84	0,11 %
6,1	94	8,73	2,18E-11	762,50	742,608	2,61 %	770,04	0,99 %

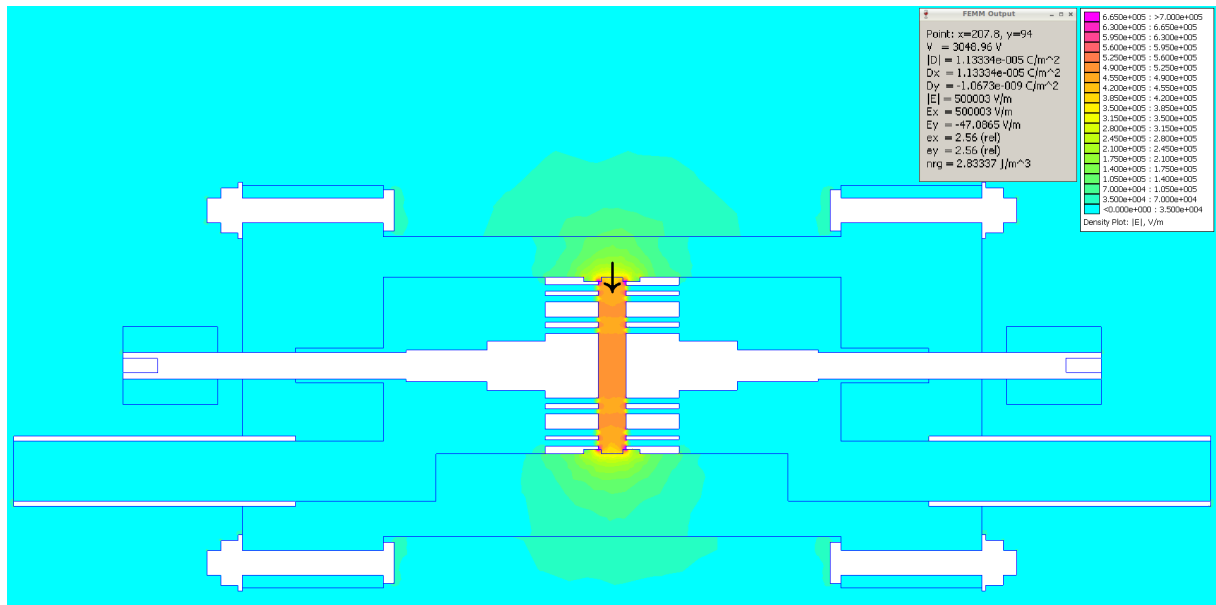


Figura A.24: Imagen de la estimación numérica de la disposición geométrica del campo electrostático para $d = 8\text{ mm}$. La flecha indica el lugar donde se tomó la intensidad de campo electrostático E_{sim} .

Para $d = 10\text{ mm}$: $\varepsilon_{r_j} = 2,56$

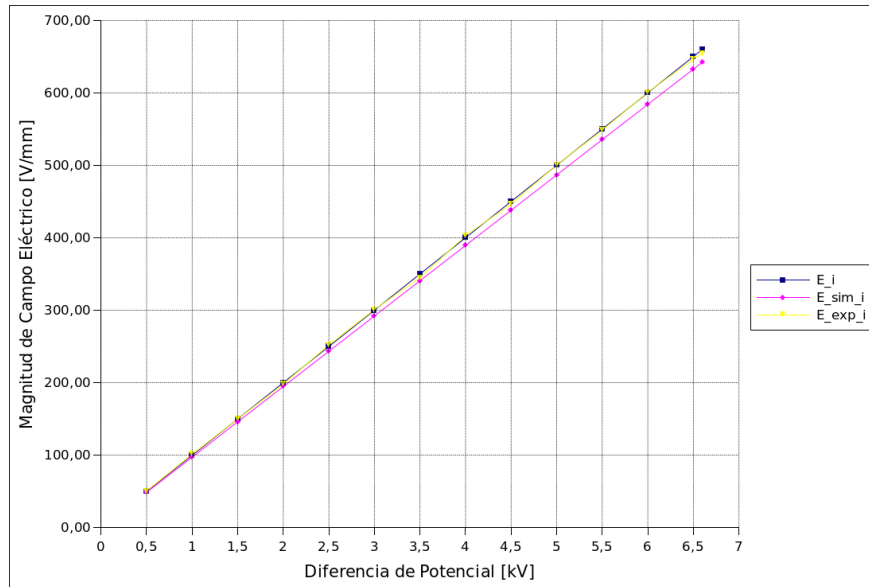


Figura A.25: Gráfica de las magnitudes de campo electrostático E_i , E_{sim_i} y E_{exp_i} , vs diferencia de potencial U_i para $d = 10\text{ mm}$: $E_i=E_i$; $E_sim_i=E_{sim_i}$; $E_exp_i=E_{exp_i}$.

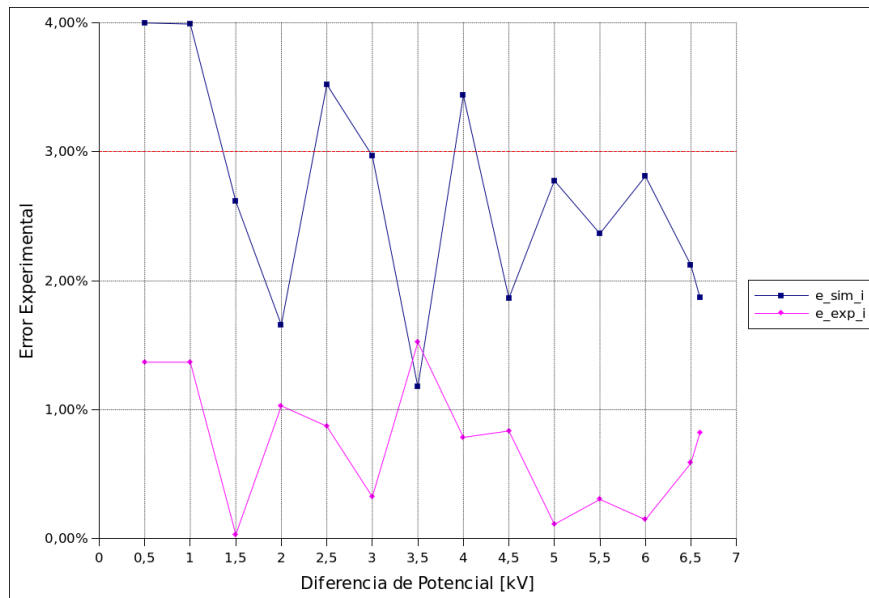


Figura A.26: Errores de simulación (e_{sim_i}) y experimentales (e_{exp_i}), vs diferencia de potencial entre placas U_i para $d = 10\text{ mm}$: $e_sim_i = e_{sim_i}$; $e_exp_i = e_{exp_i}$.

Tabla 13: Tabla de datos para $d = 10 \text{ mm}$.

U_i	I_i	F_i	ε_i	E_i	E_{sim_i}	e_{sim_i}	E_{exp_i}	e_{exp_i}
[kV]	[μA]	[mN]	[$\frac{F}{m}$]	[$\frac{V}{mm}$]	[$\frac{V}{mm}$]		[$\frac{V}{mm}$]	
0,5	6	0,04	2,33E-11	50,00	48,6667	2,67 %	50,69	1,39 %
1	12	0,16	2,33E-11	100,00	97,3429	2,66 %	101,39	1,39 %
1,5	19	0,35	2,26E-11	150,00	146,033	2,64 %	149,95	0,03 %
2	25	0,61	2,22E-11	200,00	194,686	2,66 %	197,96	1,02 %
2,5	33	0,99	2,30E-11	250,00	243,318	2,67 %	252,20	0,88 %
3	40	1,41	2,28E-11	300,00	292,048	2,65 %	300,98	0,33 %
3,5	46	1,85	2,20E-11	350,00	340,700	2,66 %	344,75	1,50 %
4	54	2,53	2,30E-11	400,00	389,309	2,67 %	403,16	0,79 %
4,5	59	3,1	2,23E-11	450,00	437,958	2,68 %	446,27	0,83 %
5	67	3,9	2,27E-11	500,00	486,667	2,67 %	500,56	0,11 %
5,5	71	4,68	2,25E-11	550,00	535,369	2,66 %	548,33	0,30 %
6	78	5,62	2,27E-11	600,00	584,001	2,67 %	600,88	0,15 %
6,5	84	6,5	2,24E-11	650,00	632,524	2,69 %	646,22	0,58 %
6,6	87	6,67	2,23E-11	660,00	642,401	2,67 %	654,61	0,82 %

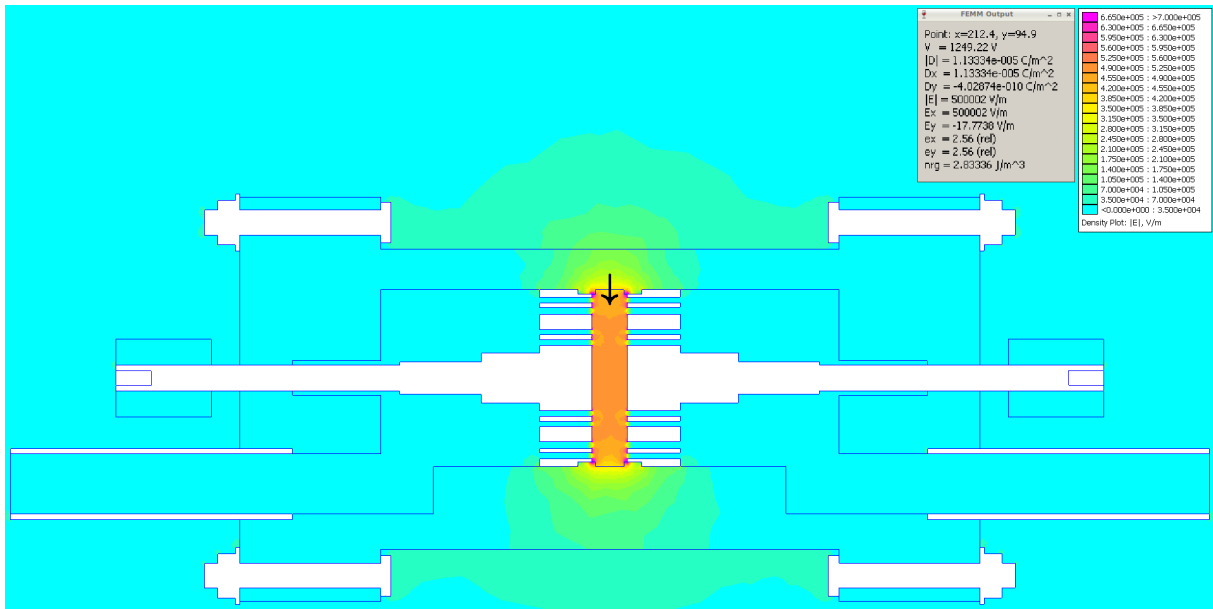


Figura A.27: Imagen de la estimación numérica de la disposición geométrica del campo electrostático para $d = 10 \text{ mm}$. La flecha indica el lugar donde se tomó la intensidad de campo electrostático E_{sim} .

Para $d = 12\text{ mm}$: $\varepsilon_{r_j} = 2,56$

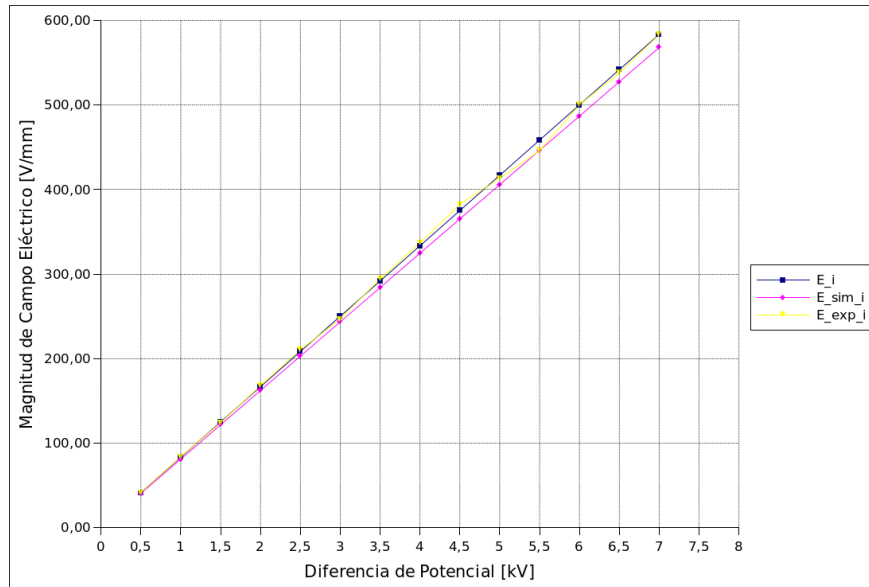


Figura A.28: Gráfica de las magnitudes de campo electrostático E_i , E_{sim_i} y E_{exp_i} , vs diferencia de potencial U_i para $d = 12\text{ mm}$: $E_i = E_i$; $E_{sim_i} = E_{sim_i}$; $E_{exp_i} = E_{exp_i}$.

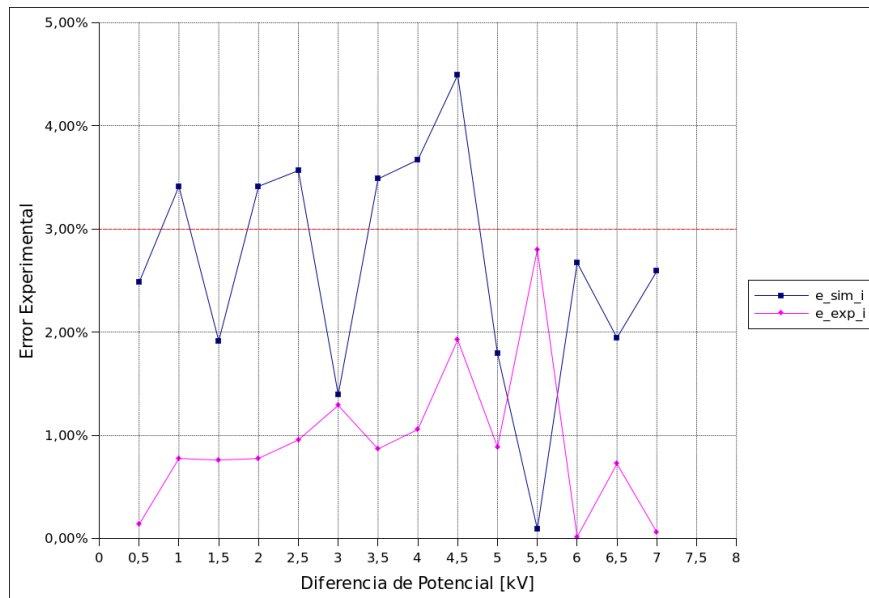


Figura A.29: Errores de simulación (e_{sim_i}) y experimentales (e_{exp_i}), vs diferencia de potencial entre placas U_i para $d = 12\text{ mm}$: $e_{sim_i} = e_{sim_i}$; $e_{exp_i} = e_{exp_i}$.

Tabla 14: Tabla de datos para $d = 12\text{ mm}$.

U_i	I_i	F_i	ε_i	E_i	E_{sim_i}	e_{sim_i}	E_{exp_i}	e_{exp_i}
[kV]	[μA]	[mN]	[$\frac{F}{m}$]	[$\frac{V}{mm}$]	[$\frac{V}{mm}$]		[$\frac{V}{mm}$]	
0,5	5	0,027	2,26E-11	41,67	40,5764	2,62 %	41,61	0,14 %
1	11	0,11	2,30E-11	83,33	81,1192	2,66 %	83,99	0,78 %
1,5	17	0,24	2,24E-11	125,00	121,679	2,66 %	124,06	0,76 %
2	23	0,44	2,30E-11	166,67	162,238	2,66 %	167,97	0,78 %
2,5	29	0,69	2,31E-11	208,33	202,846	2,63 %	210,35	0,97 %
3	35	0,95	2,21E-11	250,00	243,372	2,65 %	246,81	1,27 %
3,5	41	1,35	2,31E-11	291,67	283,968	2,64 %	294,22	0,88 %
4	47	1,77	2,32E-11	333,33	324,535	2,64 %	336,90	1,07 %
4,5	53	2,28	2,36E-11	375,00	365,188	2,62 %	382,36	1,96 %
5	57	2,66	2,23E-11	416,67	405,596	2,66 %	413,00	0,88 %
5,5	61	3,1	2,15E-11	458,33	446,261	2,63 %	445,85	2,72 %
6	69	3,9	2,27E-11	500,00	486,715	2,66 %	500,08	0,02 %
6,5	75	4,51	2,24E-11	541,67	527,306	2,65 %	537,77	0,72 %
7	80	5,3	2,27E-11	583,33	567,868	2,65 %	582,97	0,06 %

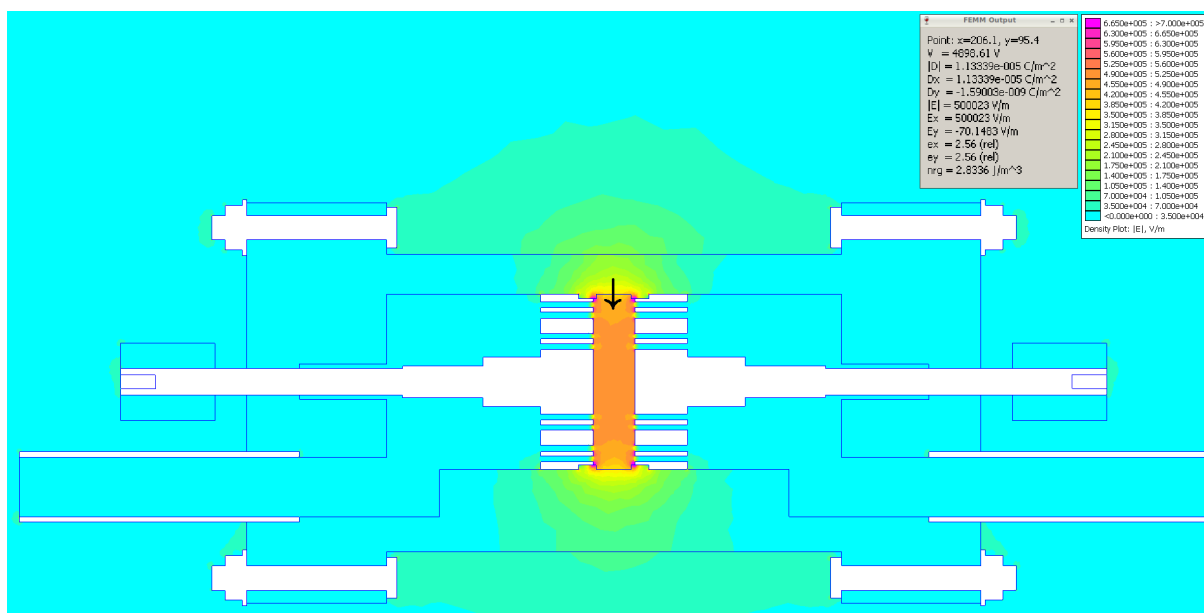


Figura A.30: Imagen de la estimación numérica de la disposición geométrica del campo electrostático para $d = 12\text{ mm}$. La flecha indica el lugar donde se tomó la intensidad de campo electrostático E_{sim} .

Para $d = 14 \text{ mm}$: $\varepsilon_{r_j} = 2,836$

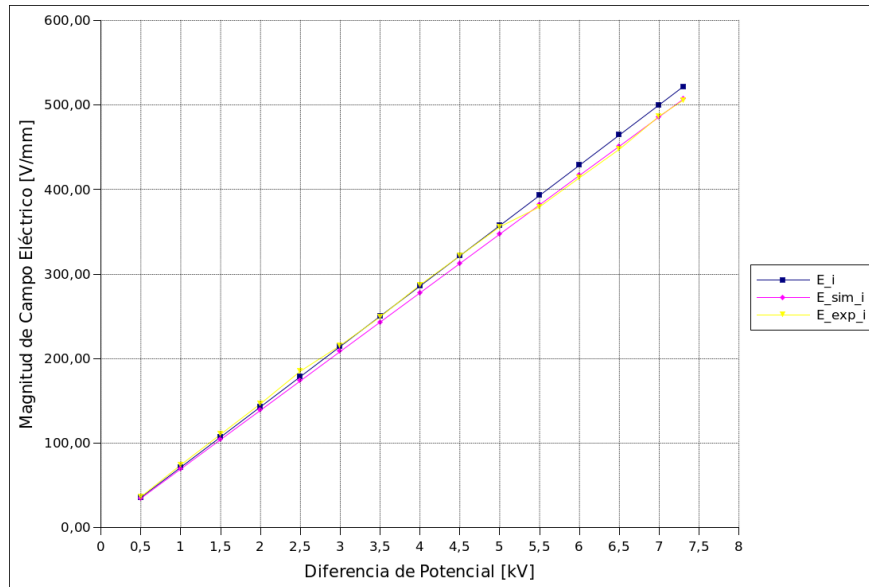


Figura A.31: Gráfica de las magnitudes de campo electrostático E_i , E_{sim_i} y E_{exp_i} , vs diferencia de potencial U_i para $d = 14 \text{ mm}$: $E_i = E_i$; $E_{sim_i} = E_{sim_i}$; $E_{exp_i} = E_{exp_i}$.

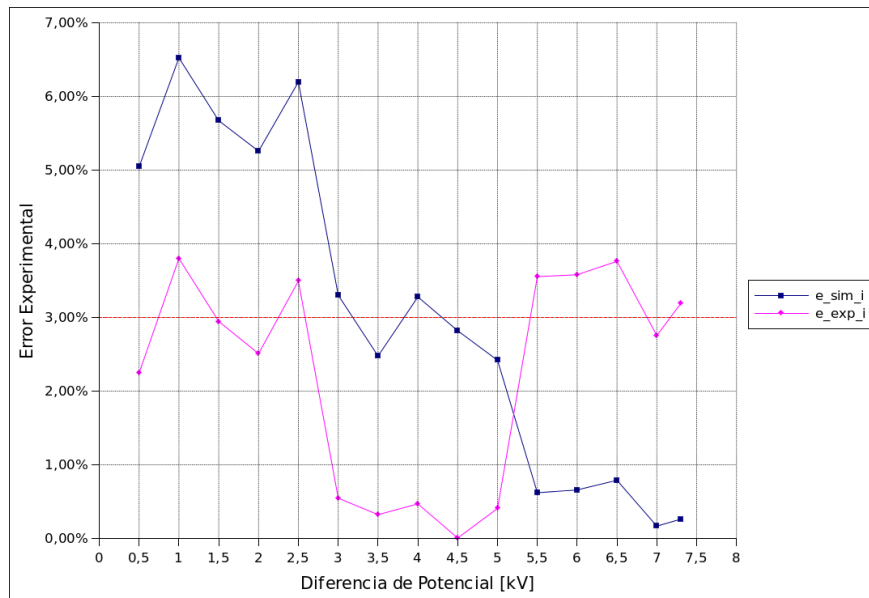


Figura A.32: Errores de simulación (e_{sim_i}) y experimentales (e_{exp_i}), vs diferencia de potencial entre placas U_i para $d = 14 \text{ mm}$: $e_{sim_i} = e_{sim_i}$; $e_{exp_i} = e_{exp_i}$.

Tabla 15: Tabla de datos para $d = 14\text{ mm}$.

U_i	I_i	F_i	ε_i	E_i	E_{sim_i}	e_{sim_i}	E_{exp_i}	e_{exp_i}
[kV]	[μA]	[mN]	[$\frac{F}{m}$]	[$\frac{V}{mm}$]	[$\frac{V}{mm}$]		[$\frac{V}{mm}$]	
0,5	5	0,02	2,62E-11	35,71	34,6919	2,86 %	36,53	2,30 %
1	10	0,10	2,71E-11	71,43	69,4079	2,83 %	74,25	3,95 %
1,5	15	0,21	2,66E-11	107,14	104,136	2,81 %	110,39	3,04 %
2	20	0,37	2,64E-11	142,86	138,832	2,82 %	146,53	2,57 %
2,5	25	0,59	2,69E-11	178,57	173,577	2,80 %	185,04	3,62 %
3	31	0,8	2,54E-11	214,29	208,352	2,77 %	215,47	0,55 %
3,5	36	1,07	2,49E-11	250,00	243,018	2,79 %	249,19	0,32 %
4	42	1,42	2,53E-11	285,71	277,655	2,82 %	287,07	0,47 %
4,5	46	1,78	2,51E-11	321,43	312,339	2,83 %	321,40	0,01 %
5	52	2,18	2,49E-11	357,14	347,079	2,82 %	355,69	0,41 %
5,5	54	2,48	2,34E-11	392,86	381,732	2,83 %	379,37	3,43 %
6	60	2,95	2,34E-11	428,57	416,495	2,82 %	413,76	3,46 %
6,5	67	3,45	2,33E-11	464,29	450,995	2,86 %	447,45	3,63 %
7	71	4,08	2,37E-11	500,00	485,771	2,85 %	486,60	2,68 %
7,3	76	4,4	2,35E-11	521,43	506,648	2,83 %	505,32	3,09 %

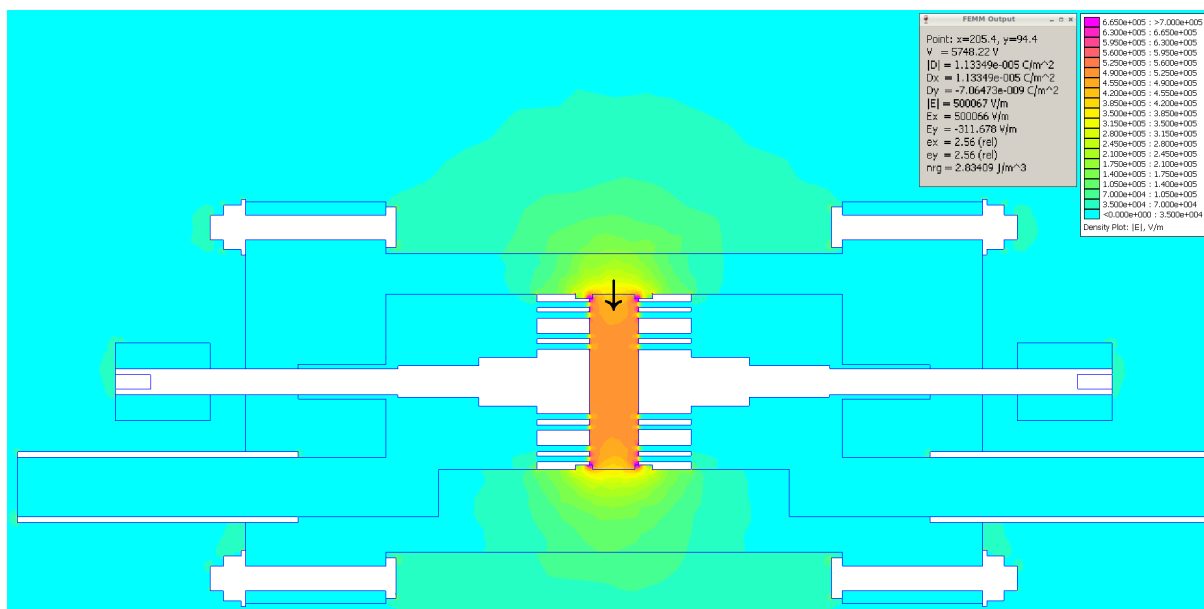


Figura A.33: Imagen de la estimación numérica de la disposición geométrica del campo electrostático para $d = 14\text{ mm}$. La flecha indica el lugar donde se tomó la intensidad de campo electrostático E_{sim} .

Para $d = 16 \text{ mm}$: $\varepsilon_{r_j} = 2,84$

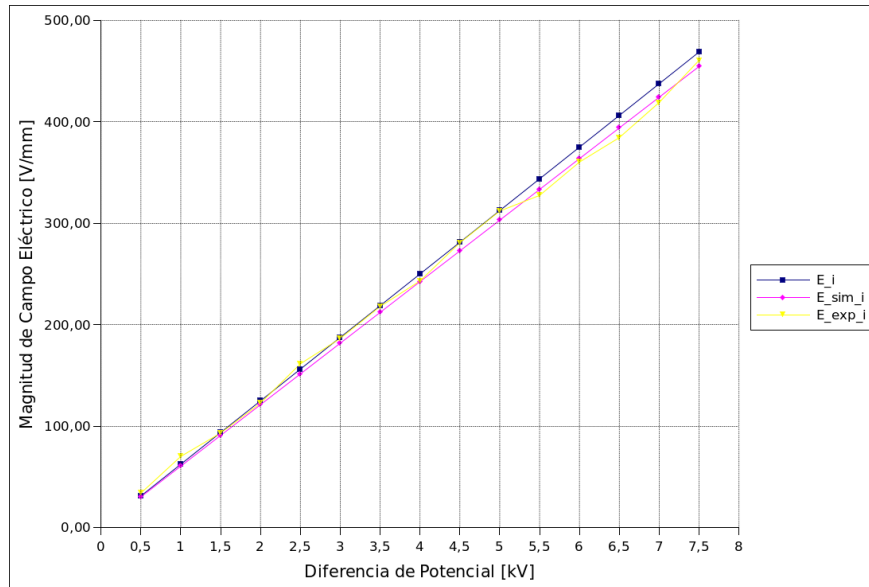


Figura A.34: Gráfica de las magnitudes de campo electrostático E_i , E_{sim_i} y E_{exp_i} , vs diferencia de potencial U_i para $d = 16 \text{ mm}$: $E_i = E_i$; $E_{sim_i} = E_{sim_i}$; $E_{exp_i} = E_{exp_i}$.

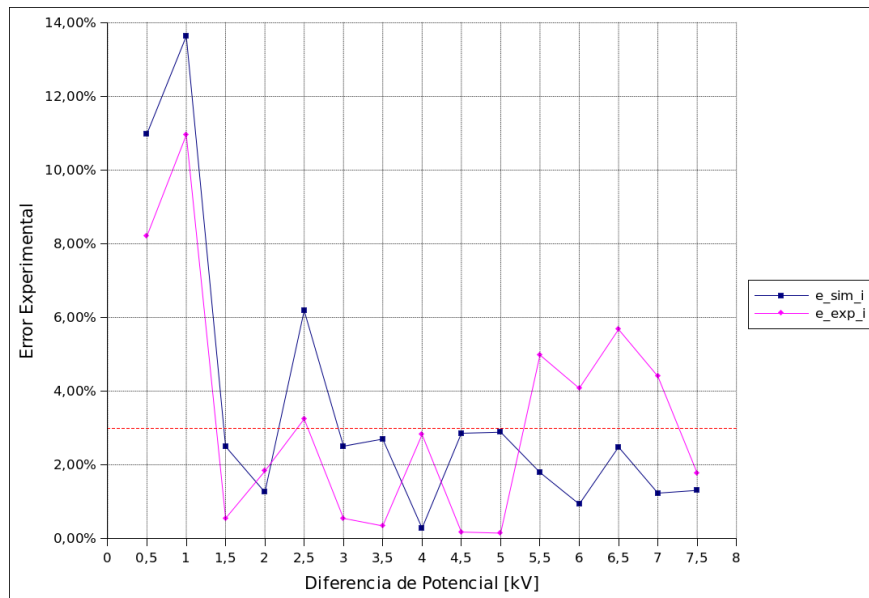


Figura A.35: Errores de simulación (e_{sim_i}) y experimentales (e_{exp_i}), vs diferencia de potencial entre placas U_i para $d = 16 \text{ mm}$: $e_{sim_i} = e_{sim_i}$; $e_{exp_i} = e_{exp_i}$.

Tabla 16: Tabla de datos para $d = 16 \text{ mm}$.

U_i	I_i	F_i	ε_i	E_i	E_{sim_i}	e_{sim_i}	E_{exp_i}	e_{exp_i}
[kV]	[μA]	[mN]	$\frac{F}{m}$	$\frac{V}{mm}$	$\frac{V}{mm}$		$\frac{V}{mm}$	
0,5	5	0,02	2,98E-11	31,25	30,3062	3,02 %	34,05	8,95 %
1	9	0,085	3,17E-11	62,50	60,6197	3,01 %	70,19	12,30 %
1,5	13	0,15	2,48E-11	93,75	90,9076	3,03 %	93,24	0,55 %
2	19	0,26	2,42E-11	125,00	121,207	3,03 %	122,75	1,80 %
2,5	25	0,45	2,68E-11	156,25	151,5	3,04 %	161,49	3,36 %
3	29	0,6	2,48E-11	187,50	181,796	3,04 %	186,48	0,55 %
3,5	34	0,82	2,49E-11	218,75	212,112	3,03 %	218,00	0,34 %
4	38	1,02	2,37E-11	250,00	242,443	3,02 %	243,13	2,75 %
4,5	43	1,36	2,50E-11	281,25	272,723	3,03 %	280,75	0,18 %
5	49	1,68	2,50E-11	312,50	303,017	3,03 %	312,03	0,15 %
5,5	50	1,85	2,28E-11	343,75	333,319	3,03 %	327,44	4,74 %
6	55	2,24	2,32E-11	375,00	363,674	3,02 %	360,30	3,92 %
6,5	60	2,55	2,25E-11	406,25	393,981	3,02 %	384,43	5,37 %
7	65	3,03	2,30E-11	437,50	424,224	3,03 %	419,05	4,22 %
7,5	72	3,66	2,42E-11	468,75	454,526	3,03 %	460,56	1,75 %

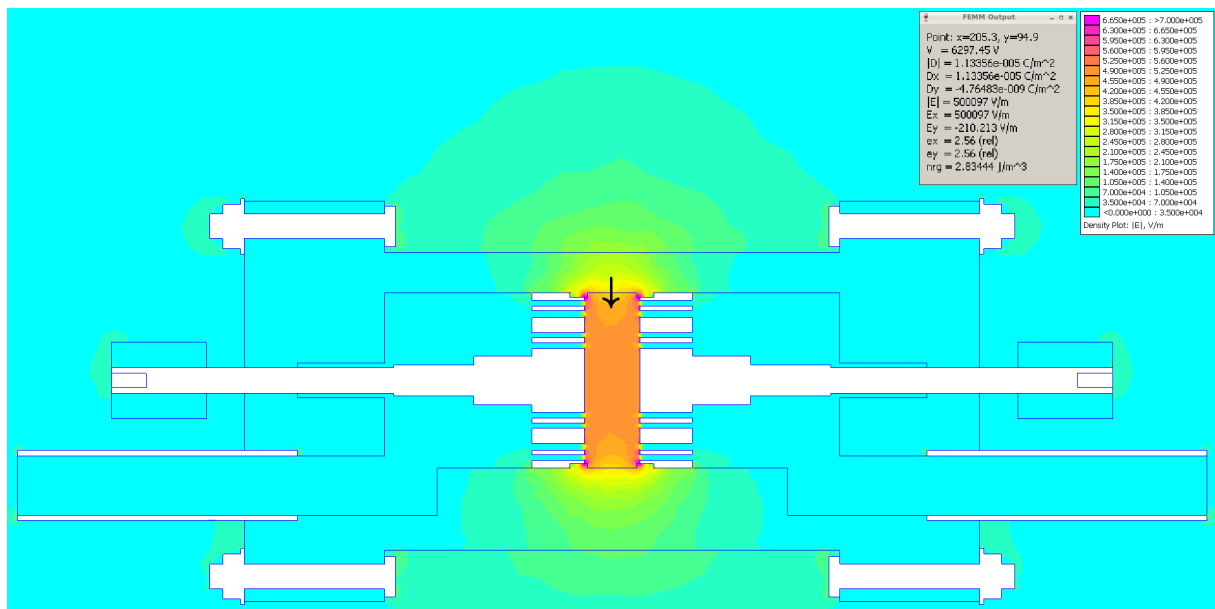


Figura A.36: Imagen de la estimación numérica de la disposición geométrica del campo electrostático para $d = 16 \text{ mm}$. La flecha indica el lugar donde se tomó la intensidad de campo electrostático E_{sim} .

Para $d = 18\text{ mm}$: $\varepsilon_{r_j} = 2,76$

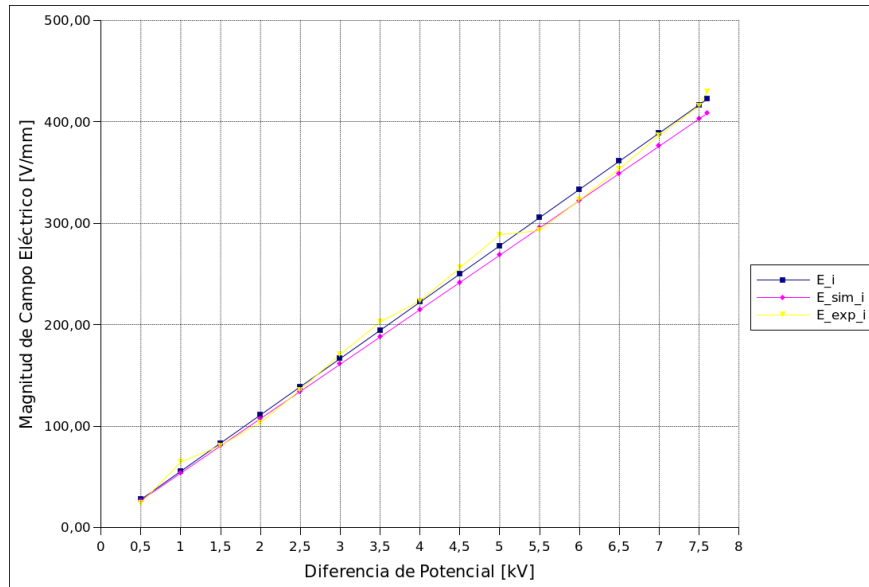


Figura A.37: Gráfica de las magnitudes de campo electrostático E_i , E_{sim_i} y E_{exp_i} , vs diferencia de potencial U_i para $d = 18\text{ mm}$: $E_i = E_i$; $E_{sim_i} = E_{sim_i}$; $E_{exp_i} = E_{exp_i}$.

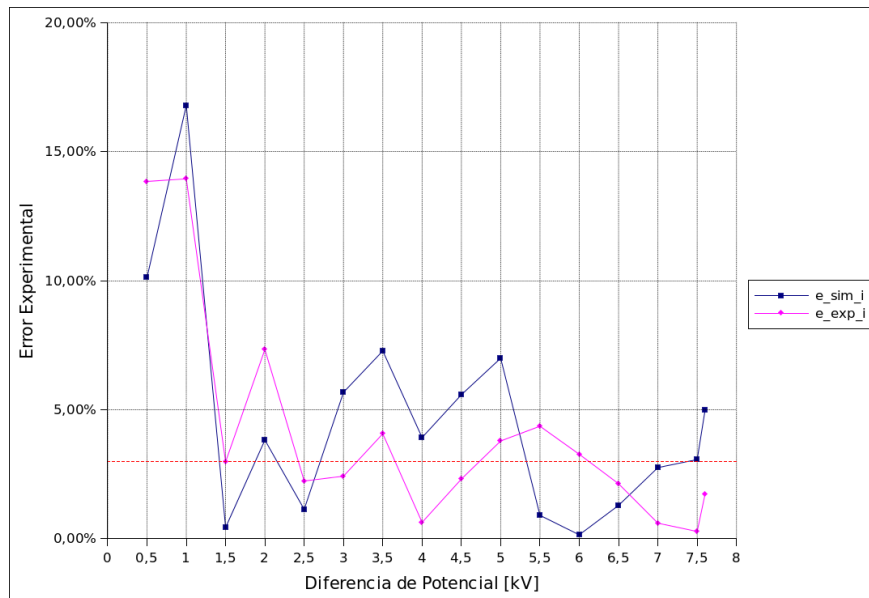


Figura A.38: Errores de simulación (e_{sim_i}) y experimentales (e_{exp_i}), vs diferencia de potencial entre placas U_i para $d = 18\text{ mm}$: $e_{sim_i} = e_{sim_i}$; $e_{exp_i} = e_{exp_i}$.

Tabla 17: Tabla de datos para $d = 18 \text{ mm}$.

U_i [kV]	I_i [μA]	F_i [mN]	ε_i [$\frac{\text{F}}{\text{m}}$]	E_i [$\frac{\text{V}}{\text{mm}}$]	E_{sim_i} [$\frac{\text{V}}{\text{mm}}$]	e_{sim_i}	E_{exp_i} [$\frac{\text{V}}{\text{mm}}$]	e_{exp_i}
0,5	4	0,01	1,89E-11	27,78	26,8683	3,27 %	24,40	12,16 %
1	9	0,07	3,30E-11	55,56	53,7165	3,31 %	64,56	16,20 %
1,5	13	0,11	2,30E-11	83,33	80,5766	3,31 %	80,93	2,89 %
2	17	0,18	2,12E-11	111,11	107,476	3,27 %	103,52	6,83 %
2,5	22	0,31	2,34E-11	138,89	134,311	3,30 %	135,85	2,18 %
3	26	0,49	2,57E-11	166,67	161,117	3,33 %	170,80	2,48 %
3,5	30	0,69	2,66E-11	194,44	187,937	3,35 %	202,68	4,24 %
4	34	0,84	2,48E-11	222,22	214,871	3,31 %	223,63	0,63 %
4,5	39	1,1	2,56E-11	250,00	241,639	3,34 %	255,91	2,36 %
5	44	1,4	2,64E-11	277,78	268,522	3,33 %	288,71	3,93 %
5,5	46	1,44	2,24E-11	305,56	295,441	3,31 %	292,80	4,17 %
6	50	1,75	2,29E-11	333,33	322,306	3,31 %	322,78	3,16 %
6,5	55	2,1	2,34E-11	361,11	349,034	3,34 %	353,59	2,08 %
7	60	2,51	2,42E-11	388,89	375,931	3,33 %	386,57	0,60 %
7,5	65	2,9	2,43E-11	416,67	402,793	3,33 %	415,52	0,28 %
7,6	67	3,1	2,53E-11	422,22	408,245	3,31 %	429,61	1,75 %

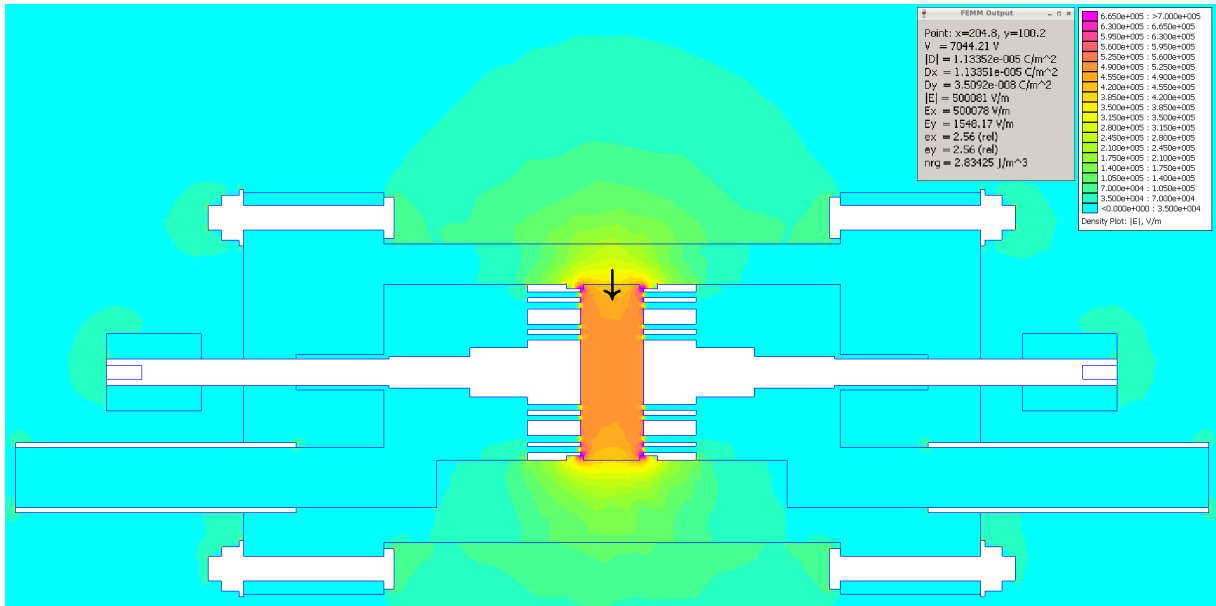


Figura A.39: Imagen de la estimación numérica de la disposición geométrica del campo electrostático para $d = 18 \text{ mm}$. La flecha indica el lugar donde se tomó la intensidad de campo electrostático E_{sim} .

Para $d = 20 \text{ mm}$: $\varepsilon_{r_j} = 3,04$

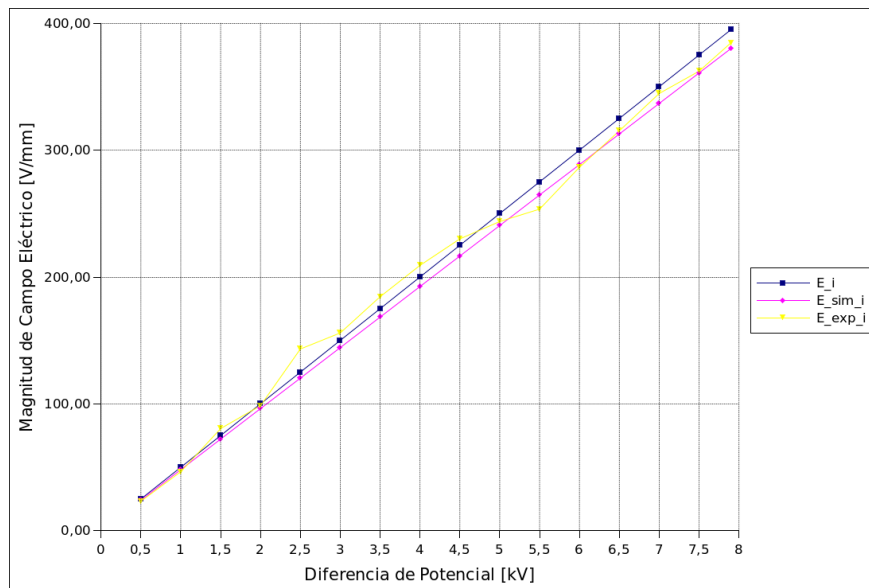


Figura A.40: Gráfica de las magnitudes de campo electrostático E_i , E_{sim_i} y E_{exp_i} , vs diferencia de potencial U_i para $d = 20 \text{ mm}$: $E_i=E_i$; $E_sim_i=E_{sim_i}$; $E_exp_i=E_{exp_i}$.

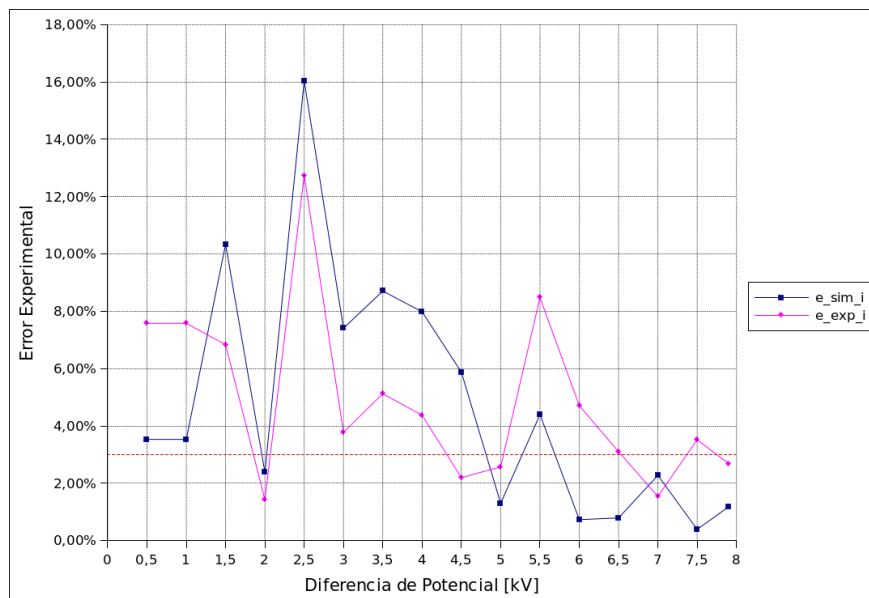


Figura A.41: Errores de simulación (e_{sim_i}) y experimentales (e_{exp_i}), vs diferencia de potencial entre placas U_i para $d = 20 \text{ mm}$: $e_sim_i = e_{sim_i}$; $e_exp_i = e_{exp_i}$.

Tabla 18: Tabla de datos para $d = 20 \text{ mm}$.

U_i [kV]	I_i [μA]	F_i [mN]	ε_i [$\frac{\text{F}}{\text{m}}$]	E_i [$\frac{\text{V}}{\text{mm}}$]	E_{sim_i} [$\frac{\text{V}}{\text{mm}}$]	e_{sim_i}	E_{exp_i} [$\frac{\text{V}}{\text{mm}}$]	e_{exp_i}
0,5	4	0,01	2,33E-11	25,00	24,06	3,76 %	23,24	7,05 %
1	8	0,04	2,33E-11	50,00	48,1188	3,76 %	46,48	7,05 %
1,5	12	0,12	3,10E-11	75,00	72,1782	3,76 %	80,50	7,33 %
2	16	0,18	2,62E-11	100,00	96,24	3,76 %	98,59	1,41 %
2,5	21	0,38	3,54E-11	125,00	120,279	3,78 %	143,25	14,60 %
3	24	0,45	2,91E-11	150,00	144,338	3,77 %	155,89	3,93 %
3,5	27	0,63	2,99E-11	175,00	168,394	3,77 %	184,45	5,40 %
4	32	0,81	2,95E-11	200,00	192,451	3,77 %	209,15	4,57 %
4,5	36	0,98	2,82E-11	225,00	216,535	3,76 %	230,05	2,24 %
5	39	1,1	2,56E-11	250,00	240,557	3,78 %	243,73	2,51 %
5,5	43	1,19	2,29E-11	275,00	264,653	3,76 %	253,50	7,82 %
6	48	1,52	2,46E-11	300,00	288,607	3,80 %	286,51	4,50 %
6,5	52	1,84	2,53E-11	325,00	312,726	3,78 %	315,22	3,01 %
7	57	2,2	2,61E-11	350,00	336,84	3,76 %	344,68	1,52 %
7,5	60	2,43	2,51E-11	375,00	360,83	3,78 %	362,25	3,40 %
7,9	73	2,74	2,56E-11	395,00	380,138	3,76 %	384,67	2,62 %

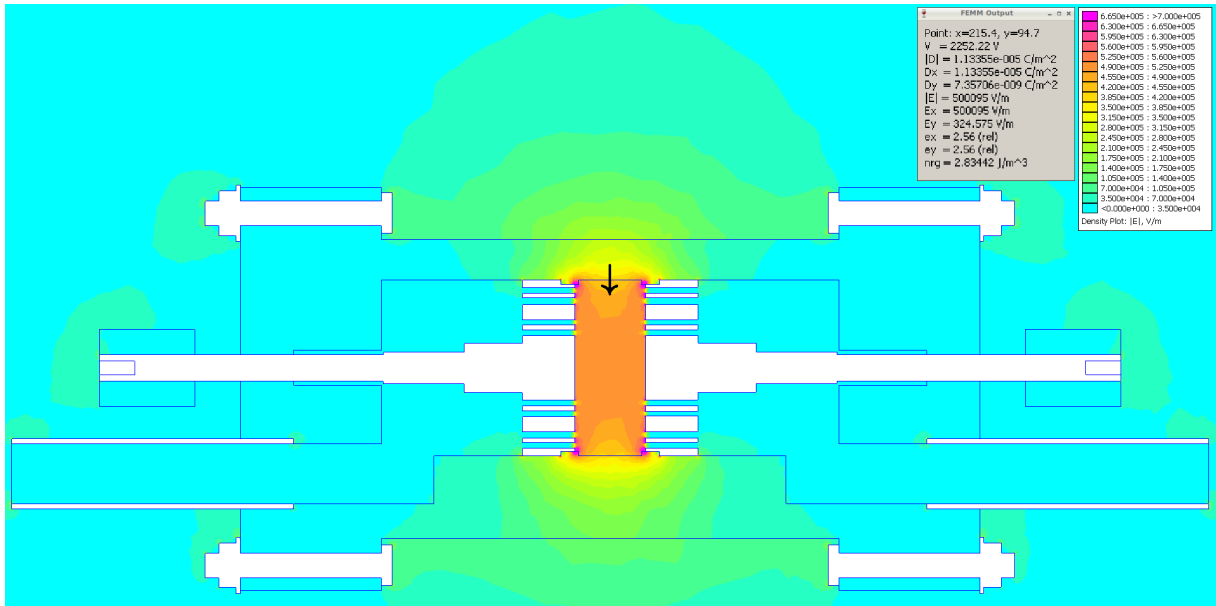


Figura A.42: Imagen de la estimación numérica de la disposición geométrica del campo electrostático para $d = 20 \text{ mm}$. La flecha indica el lugar donde se tomó la intensidad de campo electrostático E_{sim} .

B. Obtención de E_i y ε_i .

En una configuración de placas planas paralelas sometidas a una diferencia de potencial U , despreciando los efectos de borde, la magnitud de campo electrostático E es:

$$E = \frac{U}{d} \quad (\text{B.1})$$

donde U es la diferencia de potencial impuesta por la fuente y d es la distancia entre las placas.

Para el generador electrostático descrito en este artículo, asumiremos que el efecto en los bordes de las placas y en los bordes de cada orificio son despreciables.

La fuerza electrostática \vec{F} se define como:

$$\vec{F} = -q \cdot \vec{E} \quad (\text{B.2})$$

donde q es la carga en las placas. En este montaje en particular, el sensor solo registra la magnitud de la fuerza de la placa superior; es decir:

$$F = \frac{1}{2}q \cdot E \quad (\text{B.3})$$

Se define la capacitancia en una configuración como esta, como:

$$C = \frac{q}{U} = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (\text{B.4})$$

donde A es el área efectiva de cada placa. Por tener, en este caso, placas agujereadas

$$A = A_T - nA_H \quad (\text{B.5})$$

donde A_T es el área total de la placa, n es el número de agujeros y A_H es el área de cada agujero. reemplazando B.5 en B.4 y despejando para q , tenemos:

$$q = \varepsilon \frac{A_T - nA_H}{d} U \quad (\text{B.6})$$

Reemplazando B.6 y B.1 en B.3 y despejando E , tenemos:

$$F = \varepsilon \frac{A_T - nA_H}{2} E \cdot E \quad (\text{B.7})$$

$$F = \varepsilon \frac{A_T - nA_H}{2} \cdot E^2 \quad (\text{B.8})$$

$$E = \sqrt{\frac{2}{\varepsilon(A_T - A_H)} F} \quad (\text{B.9})$$

Hasta este momento, la expresión B.9 está basada en unidades del sistema internacional de medidas. Sin embargo, la fuerza mostrada por el sensor está en $[mN]$ y el valor de intensidad de campo electrostático debió ser entregado en $[\frac{V}{mm}]$. Con base en esto, se ajustaron las unidades de E y F de la siguiente manera:

$$E \cdot 10^{-3} = \sqrt{\frac{2}{\varepsilon(A_T - A_H)} F \cdot 10^{-3}} \quad (\text{B.10})$$

$$E = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-3}}{\varepsilon(A_T - A_H)} F \cdot 10^3} \quad (\text{B.11})$$

Donde, de esta manera, E se obtiene en $[\frac{V}{mm}]$ y F es sensada en $[mN]$. Si en B.8, se reemplaza B.1 y se reorganiza, tenemos:

$$\frac{U^2}{d^2} = \frac{2}{\varepsilon(A_T - A_H)} \cdot F \quad (\text{B.12})$$

$$\varepsilon = \frac{2d^2}{U^2(A_T - A_H)} F \quad (\text{B.13})$$

Haciendo el reajuste de unidades necesario, se llega a:

$$\varepsilon = \frac{2d^2 10^{-3}}{10^6 U^2 (A_T - A_H)} F \quad (\text{B.14})$$

Es necesario señalar que la ecuación B.14 solo aplica para este montaje y de ninguna manera representa el concepto teórico de permitividad. Esta solo es una expresión que permite, a partir de las condiciones de este montaje en particular, encontrar un valor experimental de permitividad.

Las expresiones (B.11) y (B.14) concuerdan con las presentadas en [22].

C. Diseño, evolución y construcción del prototipo de la herramienta electrostática.

C.1. Ideas iniciales.

Se plantea el diseño de unas placas ubicadas fuera de la tubería de acero inoxidable del banco de pruebas por donde circularía el crudo, esto implica aislar eléctricamente las placas de la tubería, lo cual no es viable por dos razones: la distancia entre las placas es demasiado grande y la tubería de acero funcionaría como una pantalla contra el campo por el cual se desviaría sin poder afectar al crudo.

Dado lo anterior, se reemplazó una sección de tubería de acero con una sección de tubería de material aislante del mismo calibre que se acoplara por medio de roscas a la tubería original. Esto soluciona el problema de la desviación del campo a través del acero pero no se mejora del todo el problema de la distancia entre las placas y el aislante ya que sería lo suficientemente considerable para atenuar el campo entre estas.

Como se nombró en la sección 1 del artículo, la industria petroquímica emplea el campo electrostático en deshidratadores²¹, aplicándolo de forma transversal al flujo del crudo y ubicando las placas conductoras en contacto directo con el mismo. Ver figura C.1.

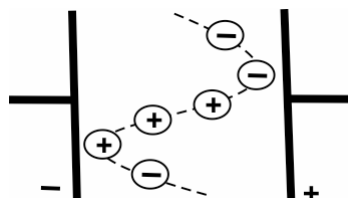


Figura C.1: Configuración de electrodos en un deshidratador electrostático. FUENTE: [4]

C.2. Requerimientos básicos.

Surgen ciertos requerimientos gracias a resultados obtenidos en la investigación realizada por [13] en dónde se encuentra que los efectos del campo electrostático transversal al flujo del crudo, indican afectar de manera negativa la movilidad del crudo del C.E.C., es decir que disminuye su movilidad y por tanto se hace más propenso a precipitaciones o cristalizaciones.

Esto descarta por completo la idea inicial y dejaba como única opción posible la aplicación de un campo electrostático longitudinal al flujo del crudo, que obligaba a asumir que las placas deben estar en contacto con las muestras de crudo. Otra investigación que basa su funcionamiento de esta forma se muestra en la figura C.2.

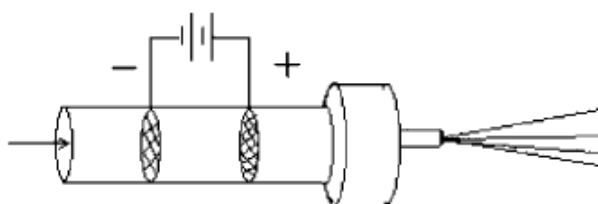


Figura C.2: Inyector de combustible con dos mayas conductoras paralelas. FUENTE: [5].

C.3. Primeras especificaciones del prototipo.

Teniendo en cuenta lo dicho anteriormente, las especificaciones más básicas que se debían cumplir hasta el momento son las siguientes:

²¹Instrumento o equipo que permite probar de manera sistemática formulaciones desemulsionantes para deshidratar el petróleo y separar el agua emulsionada. [4]

- El prototipo de la herramienta generadora de campo electrostático debe ser acoplable al banco de pruebas del C.E.C.
- La tubería de acero inoxidable del banco de pruebas tiene un diámetro de $\frac{1}{2}$ " a la cual el prototipo se debe adaptar.
- Se dispone de una longitud máxima de 40 cm para el diseño del prototipo.
- El prototipo se debe aislar eléctricamente de la tubería de acero inoxidable del banco de pruebas para evitar cualquier descarga eléctrica indeseada.
- Las placas conductoras deben ser desplazables de tal forma que la distancia entre ellas se pueda modificar a conveniencia además de mantenerse siempre paralelas entre sí.
- Al ubicar las placas perpendicularmente a la dirección del crudo, estas se deben perforar para permitir la circulación del mismo.
- Se debe garantizar una intensidad de campo electrostático de $500 \frac{V}{mm}$.

C.4. Primer prototipo de herramienta electrostática.

Dadas las condiciones anteriores, se diseñó un sistema estructural que consta de varias partes esenciales:

- Una tubería en material aislante de $\frac{1}{2}$ " que contiene en su interior las placas que van a generar el campo electrostático.
- Una placa metálica cilíndrica roscada perforada, perpendicular al flujo del crudo e incrustada internamente en la tubería aislante para evitar su desplazamiento.
- Una segunda placa, similar a un pasador metálico, cilíndrico y perforado longitudinalmente que se desplaza internamente hasta una distancia máxima igual al diámetro del mismo y una distancia mínima de 1 mm, con una guía en la parte inferior y una correa dentada en la parte superior adheridas, del mismo material.
- Un tornillo sin-fin en material aislante ubicado en la parte superior de la tubería aislante que casa con la correa dentada del pasador metálico y permite su desplazamiento.
- Dos empaques plásticos llamados O-Ring incrustados dentro de la tubería aislante y que abrazan al pasador metálico a cada lado y evitan que el crudo se escape.
- Un pin metálico para cada placa que atraviesan la tubería transversalmente y hacen contacto con estas, sirviendo de borne para conectar los cables de la fuente de alta tensión.

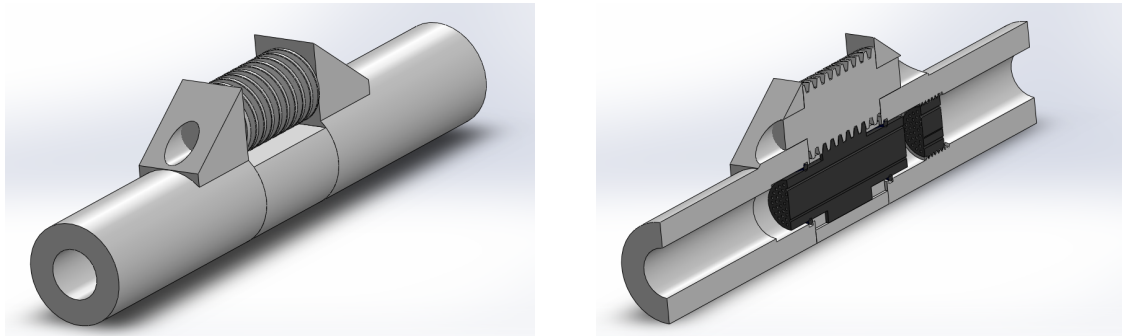
La figura C.3 muestra el diseño realizado. Así pues, se garantizan las condiciones expuestas así como también el campo electrostático requerido ($500 \frac{V}{mm}$) ya que con una distancia entre placas de 5 mm sólo es necesaria una tensión aplicada de 2,5 kV. Además la longitud del prototipo no supera los 20 cm de longitud.

C.5. Complicaciones con el diseño del primer prototipo.

El diseño anterior no se consolidó dadas ciertas razones por parte del proveedor sobre la construcción de la herramienta, que obligaron a rediseñar el prototipo y el sistema de funcionamiento, pues internamente sus medidas son demasiado pequeñas y hacen casi imposible su construcción sin llegar a cometer un margen de error.

Un ejemplo eran los empaques tipo O-Ring. Si estos llegan a quedar muy desajustados con respecto al pasador o a la tubería, el crudo puede fugarse a través del tornillo sin-fin. Si por el contrario estos llegan a quedar muy ajustados, se hace muy difícil el desplazamiento de la pieza metálica y peor aún se corre el riesgo de romper los empaques dañando el prototipo y provocando una fuga mayor que pone en riesgo todo el sistema del banco de pruebas.

Así pues los proveedores no garantizan el correcto funcionamiento de la herramienta y por ende no se comprometen con la construcción de la misma.



(a) Diseño del prototipo en perspectiva.

(b) Corte longitudinal del prototipo en perspectiva.

Figura C.3: Primer prototipo de la herramienta eléctrica. FUENTE: Los autores.

C.6. Especificaciones importantes y definitivas para el prototipo.

Se acordaron entonces ciertas condiciones tanto con los proveedores como con los directores del presente trabajo de investigación:

- El prototipo debe ser más sencillo y con mayores dimensiones que facilitan la construcción y garantizan su correcto funcionamiento.
- El área transversal disponible en el banco de pruebas para el prototipo entero es de $15 \times 15 \text{ cm}^2$ asumiendo una sección cuadrada.
- Se decide concretar un diámetro de 5 cm para las placas metálicas, dejando el espacio suficiente para la estructura polimérica y así cumplir con los dos primeros ítems.
- La distancia mínima entre las caras internas de las placas es de 2 mm dados los resultados de las pruebas de laboratorio en la sección 6 del artículo.
- La distancia máxima entre las caras internas de las placas es de $6,7 \text{ cm}$, para permitir futuras pruebas en trabajos de investigación con tensiones más altas y tiempos de exposición más grandes para el crudo bajo efecto de campos eléctricos, y no sobrepasar el límite de longitud para toda la herramienta de 40 cm .
- Mantener la condición de intensidad de campo electrostático de mínimo $500 \frac{\text{V}}{\text{mm}}$.

C.7. Prototipo final de la herramienta de campo electrostático

Concretado esto, se diseñó el nuevo prototipo mostrado del cual se presentan las imágenes en la figura 3.1 del artículo.

Este diseño cumple con las especificaciones anteriormente nombradas y se compone de las siguientes partes importantes:

- Placas metálicas iguales de 5 cm de diámetro, con agujeros de 2 mm de diámetro con un área hueca de aprox. 30% sobre el área total de la placa, un eje de soporte del mismo material, roscado casi en toda su extensión y en su extremo un conector hembra tipo banana de 4 mm de diámetro.
- Un anillo en aislante de 5 cm de diámetro exterior y 1 mm de espesor, se adhieren a las placas metálicas en sus caras internas para garantizar los 2 mm de separación entre estas y evitar un corto circuito por contacto.
- Un contenedor cilíndrico en aislante que contiene las placas y se acopla con la tubería de acero inoxidable de $\frac{1}{2}$ " del banco de pruebas, por donde circula el crudo. Tiene una abertura cilíndrica longitudinal roscada en ambas tapas del contenedor donde ajusta la barra metálica de soporte de las placas.

- Este acople roscado permitirá el movimiento rotacional y traslacional de las placas en el interior del cilindro a razón de una vuelta del eje por 1 mm de distancia longitudinal de placa.
- Dos empaque tipo O-Ring en las tapas de cierre del contenedor cilíndrico que garantizan la impermeabilidad de la herramienta.
- Un agarre antideslizante y aislante al final de cada barra de soporte permite girar y desplazar las placas con facilidad y tranquilidad.
- Por último el diámetro de toda la herramienta es de $11,5\text{ cm}$ y una longitud máxima (con placas desplazadas a máxima distancia entre sí) de 34 cm , cumpliendo con los requerimientos especificados.

C.8. Construcción del prototipo de la herramienta electrostática

C.8.1. Fabricante

Para éste proceso se recurrió a la empresa Torno Partes²² un sitio especializado en servicio de torno, fresadora y construcción de piezas mecánicas.

C.8.2. Materiales

En la construcción de las placas metálicas y sus ejes de soporte mecánico se utilizó el aluminio laminado como se dijo anteriormente en la sección 3 del artículo. Así mismo el material polimérico aislante usado para la estructura de la herramienta fue el UHMW (ver tabla 1 del artículo). Son materiales con las características suficientes para soportar las tensiones o esfuerzos mecánicos y eléctricos que se requieren para esta herramienta.,

C.8.3. Pasos de la construcción



Figura C.4: Foto tomada durante la construcción de la herramienta electrostática. FUENTE: Los autores.

- Inicialmente se maquina la estructura polimérica de la herramienta en la máquina de torno, la cual tiene una forma cilíndrica en toda su extensión.

²²Calle 20 No. 13-30. Teléfono: 6717608. Telefax: 6716407. Cel. 3164702551. Bucaramanga, Colombia. E-mail: tornopartesgerencia@gmail.com.

- Seguido a esto se realiza un trabajo de fresado para realizar las distintas aberturas cilíndricas en la estructura que se necesitan para acoplar las diferentes piezas del prototipo.
- Por otra parte, se comienza con la realización de las placas de aluminio que al igual que el cilindro tienen un trabajo de torno y fresadora. Se realiza también el roscado del eje de soporte metálico que se acopla con la estructura del cilindro.
- Se construyen las pequeñas piezas que hacen parte del diseño como lo son el anillo aislante que evita el contacto entre las placas y el agarre aislante que permite la rotación del eje de soporte.
- Se lleva a cabo el acople de las piezas y se realizan los ajustes y calibraciones necesarias para que el sistema funcione correctamente.
- Se ensamblan las piezas y se ajustan con los empaques plásticos necesarios para impedir cualquier tipo de fuga hacia afuera de la herramienta.

Los detalles exactos de la construcción no se describen ya que no son revelados por el fabricante.

C.8.4. Prototipo construido

Las imágenes que muestran cada una de las partes de la herramienta y el ensamble de las mismas se encuentran en la figura 6.1 del artículo.

D. Diseño y construcción de placas de laboratorio: Réplicas de Placas Metálicas del Prototipo de la Herramienta Electroestática

D.1. Medidas y dimensiones

Para el diseño y fabricación de las réplicas metálicas fue necesario adquirir las medidas exactas tanto de las placas del prototipo real de la herramienta de campo electrostático (ver Anexo C) como de las placas del sistema "Efectos de una fuerza en un campo eléctrico – Balanza de tensión de Kirchhoff" [20] del Laboratorio de Electromagnetismo I de la Escuela de Física de la UIS, de tal forma que las placas en sí son idénticas a las del prototipo y los ejes de soporte son exactos a los ejes de las placas del sistema de Kirchhoff.

- Las placas son planas paralelas conductoras de 50 *mm* de diámetro y 3 *mm* de espesor, contienen agujeros de 2 *mm* de diámetro repartidos uniformemente, con un porcentaje de área hueca de casi 30 % sobre el área total de la placa. Así pues se logra estimar la intensidad de campo electrostático que se establece entre las placas del prototipo real al aplicar una diferencia de tensión en ellas.
- Los ejes de soporte tienen medidas exactas sobre los puntos y piezas que se acoplan a los soportes que sostienen las placas en el sistema de Kirchhoff (ver figura 4.3 del artículo). La placa superior se conecta por medio del par de pines a una presilla conductora de soporte que a su vez se conecta al sensor de fuerza. La placa inferior se coloca dentro del soporte vertical graduado. Esto permite ubicar las réplicas en el sistema y realizar los ajustes necesarios para que se mantengan verticalmente alineadas y paralelas entre sí.

D.2. Material

Se utilizó el aluminio para la fabricación de las réplicas ya que además de ser el mismo material de las placas de laboratorio, tiene varias ventajas y características: es buen conductor eléctrico, es un metal ligero, es blando y maleable, no ferromagnético²³, disponible en el mercado y económico.

El hecho de que sea un material no ferromagnético es una característica muy importante ya que evita que las placas sufran algún ordenamiento magnético y se vean expuestas a un campo magnético entre sí que pueda afectar las mediciones y lecturas del sistema. Por otra parte, aunque el aluminio sea un buen conductor, es irrelevante para el experimento ya que se trabajará con campos electrostáticos en donde no existen flujos de corriente significativos.

En cambio, sí es importante que el metal sea blando, maleable y ligero para que facilite la construcción y acople de las placas con las medidas requeridas para el sistema de laboratorio.

D.3. Construcción de las réplicas

Para éste proceso se recurrió nuevamente a la empresa Torno Partes.

Básicamente se realiza un maquinado en torno del material de aluminio teniendo en cuenta los diámetros, espesores y longitudes especificadas para cada una de las piezas. Después se realizan las guías concéntricas para la realización de los agujeros con taladro y broca de 2 *mm*. Por último se incrustan los pines de la placa superior y se realiza el agujero transversal de 4 *mm* en el eje de soporte de la placa inferior.

Las imágenes de las réplicas se encuentran en la figura 4.2 del artículo.

²³El ferromagnetismo es la alineación permanente de los momentos magnéticos de los átomos de un material ante la presencia de un campo magnético externo. [26]