



## **FACULTAD DE INGENIERÍA**

### **CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

#### **TRABAJO PRÁCTICO N°2**

Electrostática

**MATERIA:**

FÍSICA II

**COMISIÓN:**

Viernes de 14 a 16 hs

**INTEGRANTES:**

ALLAY ALFONSO, MARÍA MASHAEL (12605);

BORQUEZ PEREZ, JUAN MANUEL (13567);

23/04/2021

**Tabla de Contenidos**

Introducción.....	4
Objetivos.....	4
Experiencia 2.1 - Carga de un Cuerpo. Interacción Electrostática.....	5
Primera Parte.....	5
Segunda Parte.....	6
Conclusión Experiencia 1.1.....	7
Experiencia 2.2 - Doble Jaula de Faraday. Electrómetro.....	8
Descripción de los Instrumentos utilizados en la Experiencia.....	8
Electrómetro PASCO modelo ES-9054B.....	8
Algunas Características del Instrumento.....	9
Preparación del Electrómetro.....	10
Jaula de Faraday PASCO Modelo ES-9042A.....	10
Generadores de Carga.....	11
Descripción de los Pasos de la Experiencia.....	12
Descripción de los resultados obtenidos en la experiencia.....	14
Inducción Electrostática.....	14
Carga por contacto.....	15
Resultados obtenidos.....	16

Experiencia 2.3 - Potencial y Campo Eléctrico.....	18
Procedimiento del Experimento.....	18
Experiencia 2.4 - Generador Electrostático de Van de Graaff.....	24
Descripción de las Partes del Generador.....	24
Descripción del Funcionamiento.....	25
Experimentos con el generador.....	29
Carga y Descarga de Piezas Metálicas por Inducción y Contacto.....	29
Efectos de Atracción y Repulsión.....	29
Descarga de Tubos de Gas.....	29
Efecto de Puntas.....	30
Mostrar en el Plano la Forma de las Líneas de Campo.....	30
Conclusión.....	31

## **Introducción**

En el presente trabajo realizaremos el trabajo práctico nº2 del laboratorio de física, llamado “Electrostática”; donde a través de 4 experiencias distintas observaremos la existencia de las fuerzas de interacción electrostática.

Estas actividades nos ayudarán a entender y experimentar la ley de carga, el principio de conservación de carga, la ley de Coulomb y Ley de Gauss.

Nos familiarizaremos con nuevos instrumentos de laboratorio, aprendiendo sus partes y su debido funcionamiento.

## **Objetivos**

Cargar eléctricamente cuerpos por frotamiento. Comprobar experimentalmente la existencia de fuerzas de interacción electrostática.

Cargar eléctricamente cuerpos por inducción. Conocer y manejar el electróforo y el electroscopio.

Generar y ponderar cantidades de carga eléctrica utilizando un electrómetro y una doble jaula de Faraday.

Generar campos electrostáticos con distintas configuraciones y medir el potencial asociado.

Presentar y operar un generador de Van de Graaff, reconocer sus partes esenciales e interpretar su funcionamiento.

Demostrar fenómenos particulares, factibles cuando se dispone de alto potencial electrostático.

**Experiencia 2.1 - Carga de un Cuerpo. Interacción Electrostática.*****Primera Parte***

En la primera parte de esta experiencia el objetivo es cargar eléctricamente cuerpos por frotamiento, experiencia realizada por el filósofo Thales años atrás, quien al frotar dos varillas de ámbar con un paño de lana observó que al momento de acercar ambas varillas estas se repelían, a su vez, el ámbar lograba atraer pequeños objetos sin carga.

Lo que podemos observar en los resultados del trabajo brindado por la cátedra es que, al frotar 2 barras de vidrio con un pañuelo de seda, y colocar una de ellas sobre un soporte pivotante, al momento que acercamos la barra restante la primera comenzará a alejarse, pues ambas se repelen. Esto se debe a que ambas varillas poseen un exceso de carga positiva pues le cedieron electrones al pañuelo de seda que adquirió una carga eléctrica negativa. Lo mismo sucede cuando ambas varillas cargadas positivamente son colocadas en soportes pivotaes no conductores, estas comenzarán a alejarse.

Al realizar la misma experiencia con 2 barras de plástico y un trapo de lana, sucedía lo mismo, ambas varillas se repelían, pero a diferencia de las barras de vidrio, estas adquirieron un exceso de carga negativa.

Por lo tanto, al poner en interacción una varilla de vidrio junto con una de plástico, ambas frotadas previamente con un paño de seda y lana respectivamente, estas se atraen.

Realizamos esta misma experiencia en casa con materiales disponibles a nuestro alcance, utilizamos dos sorbetes que cargamos eléctricamente con la ayuda de un paño de cocina amarillo seco, frotamos ambos sorbetes y colocamos uno sobre un pivotal hecho con una lapicera, una goma y un alfiler para sostener el sorbete. Acercamos el sorbete restante al del pivotal y podemos observar como se repelen e intentan alejarse. Luego cargamos el sorbete

del pivotal nuevamente y un pequeño frasco de vidrio, pero al acercarlo el sorbete se pegaba a este.

El siguiente link los conducirá a un video guardado en drive, donde subimos la experiencia:

[https://drive.google.com/file/d/14UkTbxmuxzR\\_yn0FqQ5Ijp5ErokDpo0z/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/14UkTbxmuxzR_yn0FqQ5Ijp5ErokDpo0z/view?usp=sharing).

### ***Segunda Parte***

El objetivo de la segunda parte es cargar cuerpos eléctricamente por inducción y por contacto, además de familiarizarnos con un electróforo y un electroscopio.

Un electróforo consiste en una placa de material aislante que se carga frotándola con un paño.

Un electroscopio (*Imagen 1*) es un instrumento que es capaz de indicar el exceso de carga en un cuerpo. Consiste en una placa conductora fija a un soporte aislante; sobre esta placa pivota otra placa conductora, móvil, que en equilibrio adopta la posición vertical.



*Imagen 1: Electroscopio junto a dos discos conductores*

En años pasados utilizaron como material aislante un cuadrado de telgopor cargado mediante frotamiento por un paño de lana, de esta manera la placa aislante adquiere una carga eléctrica negativa. Se apoya sobre el telgopor un disco conductor sujeto a un mango aislante para lograr desplazarlo. Cuando el disco conductor es apoyado sobre el telgopor cargado negativamente, el disco se polariza. Apoyamos un dedo sobre la parte superior del disco, nuestro cuerpo funcionará como un cable a tierra para aquellas cargas negativas que fueron repelidas por el aislante.

Así al separar el disco del telgopor quedará cargado positivamente.

Este procedimiento en el laboratorio debe repetirse algunas veces, ya que el disco va perdiendo cargas contra el ambiente y la corriente de aire. La humedad acelera este efecto.

Al acercar dicho disco a la esfera del electroscope, sin tocarla, se inducen cargas de signo contrario a las que tenía el disco, estas cargas se inducen además en ambas placas. La repulsión entre estas placas, debido a que ambas quedaron con cargas eléctricas negativas, hace que la placa móvil se aleje de la fija. El ángulo entre estas placas es mayor cuanto más cerca esté el disco de la esfera hasta que finalmente hace contacto con el electroscope, mostrándonos el mayor ángulo posible en este caso. Por contacto con nuestro dedo vuelven a su posición original.

### ***Conclusión Experiencia 1.1***

Debemos aclarar que no todos los materiales poseen la propiedad que les permite cargarse eléctricamente, además, estas cargas varían.

De estas experiencias se puede deducir que existen dos tipos de carga (positiva y negativa), y que estas cargas al ser del mismo signo se repelen, de lo contrario, al ser de signos opuestos se atraen. También conocida como ley de cargas. Estas cargas además pueden ser brindadas por frotamiento, inducción y contacto.

## Experiencia 2.2 - Doble Jaula de Faraday. Electrómetro.

En esta experiencia se pueden comprobar ciertos fenómenos de la electrostática como la electrificación por contacto, por frotamiento (triboelectricidad) y la polarización por inducción, se comprueba el principio de conservación de la carga, se observa cómo el fenómeno de apantallamiento electrostático que ocurre en las llamadas Jaulas de Faraday es aprovechado para proteger de perturbaciones las mediciones en el laboratorio y se introduce un instrumento que permite medir tensiones directamente, así como también cargas y corrientes de forma indirecta, el electrómetro.

### *Descripción de los Instrumentos utilizados en la Experiencia*

**Electrómetro PASCO modelo ES-9054B.** (Imagen 2) Es un voltímetro DC de alta impedancia ( $\approx 100 \text{ T}\Omega$ ), que permite medir tensiones hasta 100V de forma directa, y permite la medición de cargas y corrientes de forma indirecta. Debido a su alta impedancia es especialmente útil para las mediciones en electrostática.



Imagen 2: Electrómetro PASCO modelo ES-9054B



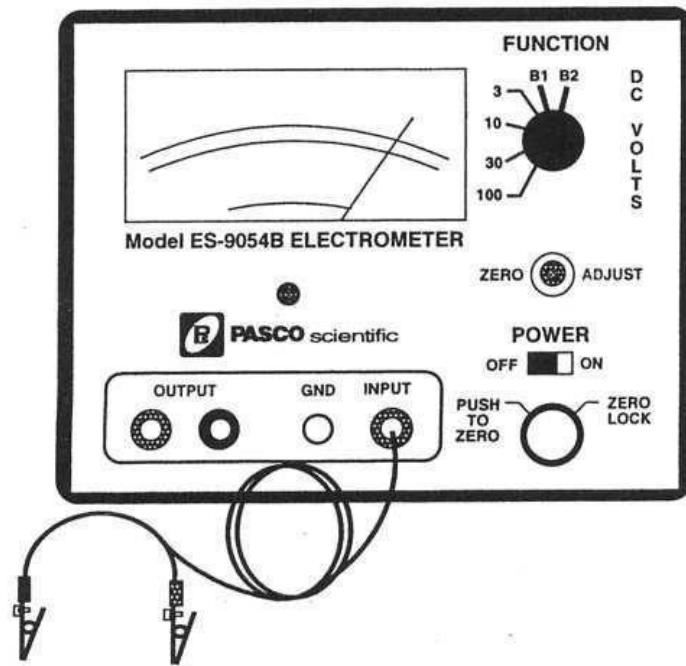


Figura 1: Electrómetro

### *Algunas Características del Instrumento*

- Cuenta con dos baterías internas de 9V cada una.
- Cuenta con una salida de tensión DC de 3.6 V para la conexión de otro instrumento de medición (según se indica en el documento del producto).
- El cable que se conecta a la entrada del instrumento (tipo BNC), tiene dos conexiones en su otro extremo (un cable rojo y otro negro con puntas de cocodrilo) que se conectan en los puntos donde se va a medir la tensión, uno de estos cables (el negro) está conectado a un blindaje metálico en el interior del cable que lo protege de las perturbaciones que puedan afectar a las mediciones y se conecta a GND en el interior del instrumento, mientras que el otro extremo (el rojo) se conecta a un conductor que pasa por el interior del blindaje y se conecta al circuito interno del instrumento. Luego, el instrumento mide el potencial del cable rojo respecto al potencial del cable negro.

***Preparación del Electrómetro.*** Según se indica en la documentación del instrumento, estos son los pasos que deben seguirse antes de comenzar a medir.

1. Ajustar a cero la aguja con el tornillo de ajuste antes de encender el equipo.
2. Encender el dispositivo y verificar las baterías. Para esto hay que colocar el selector de función en las posiciones B1 Y B2 y observar la posición que ocupa la aguja en las zonas marcadas en la parte inferior.
3. Seteo del cero del instrumento:
  - 3.1. Poner el selector de función en la posición 3.
  - 3.2. Colocar el selector del cero en la posición “Zero Lock” (permite descargar el instrumento).
  - 3.3. Ajustar el cero con la perilla de ajuste “Zero Adjust”.
4. Colocar el selector del cero en la posición “Push to Zero” (para descargar el instrumento hay que presionar la perilla).
5. Conectar el cable de la señal en el conector de entrada.
6. Conectar el cable de tierra, puede ser la conexión a tierra de un tomacorriente o bien alguna tubería conductora (por ejemplo, tuberías de cobre).

Nota 1: Durante las mediciones, el selector del cero debe estar en la posición “Push to Zero”, y es recomendable que entre mediciones se presione este botón para descargar el circuito interno del instrumento.

Nota 2: Antes de tocar las puntas de medición del instrumento, el operador debe asegurarse de estar conectado a tierra.

**Jaula de Faraday PASCO Modelo ES-9042A.** (*Imagen 3*) Consiste en un cilindro de metal enmallado sin tapa superior, de 10 cm de diámetro por 15 cm de altura sobre un soporte aislante, y un cilindro del mismo tipo sobre la plataforma, concéntrico con el primero y de

mayores dimensiones, que cumple la función de escudo del cilindro interior por el fenómeno de apantallamiento electrostático, según el cual en cada punto en el interior de un conductor del tipo Jaula de Faraday que está en equilibrio electrostático, un campo eléctrico estático externo es compensado por uno de igual magnitud y opuesto producido por la distribución de las cargas libres en la superficie externa del conductor (distribución que es causada por el campo externo).



*Imagen 3: Jaula de Faraday PASCO Modelo ES-9042A*

**Generadores de Carga.** (*Figura 2*) Los generadores de carga son dos varillas de un material aislante, conectadas en sus extremos con discos conductores recubiertos en su parte superior, uno por un material de color azul y otro por un material de color blanco.

Al frotar entre sí los generadores de carga, el que tiene recubrimiento azul queda cargado negativamente, mientras que el otro queda con carga positiva (esto se comprueba en la experiencia).

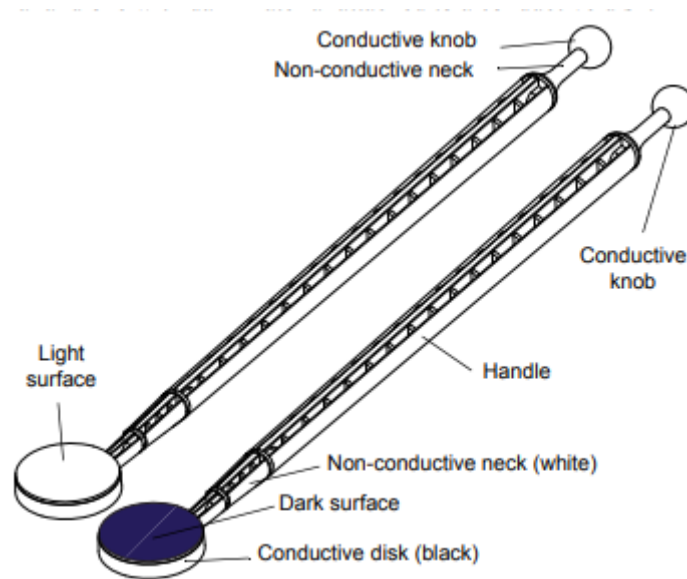


Figura 2: Generadores de carga

### Descripción de los Pasos de la Experiencia

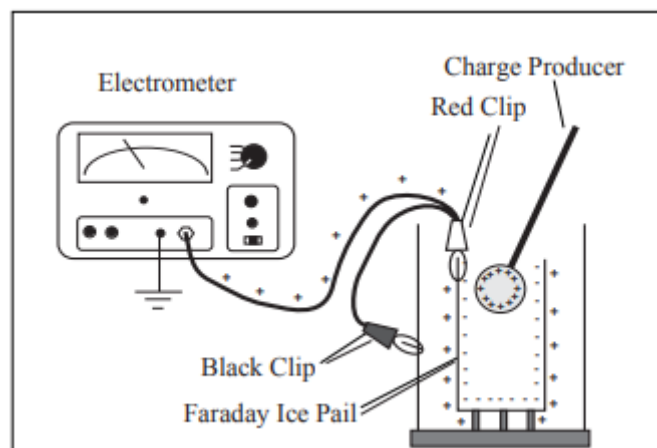


Figura 3

- a) Se llevan a cabo los pasos importantes en la preparación del electrómetro. Luego seleccionar la escala de medición de 30V (las tensiones que se van a medir están en ese rango, aunque de no saber el rango de los valores a medirse hay que comenzar probando con el mayor factor de escala e ir reduciéndolo hasta conseguir la sensibilidad requerida; la adecuada será aquella para la que la aguja se encuentre entre  $\frac{1}{3}$  y  $\frac{2}{3}$  del fondo de escala de ser posible).

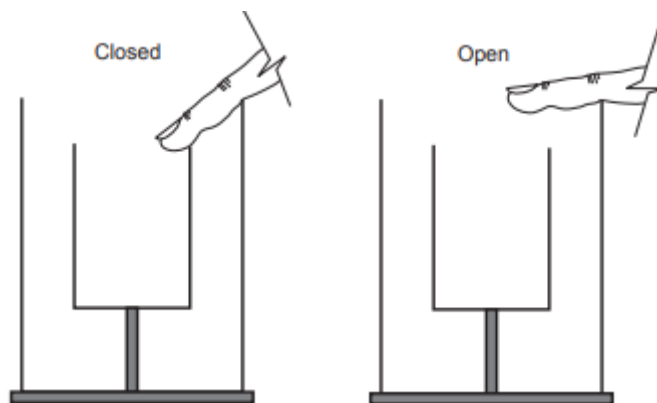
Dado que no es sabido si la jaula está cargada, antes de realizar la conexión es

conveniente girar el selector del cero a la posición de LOCK, de este modo al conectar el instrumento a la jaula, la carga que pudiera haber en ella se descarga sin peligrosidad para el instrumento.

La punta de cocodrilo del cable negro (conectado a GND) se conecta al escudo (cilindro externo) y la del cable rojo se conecta a la jaula interna.

Se gira el selector del cero a la posición “push to lock”

- b) Descargar los generadores de carga conectando tanto el mango como el disco conductor a GND del electrómetro, esto se puede lograr tocando el elemento con la jaula externa. Para asegurar que están libres de cargas, se pueden posar sobre la palma de una mano y exhalar suavemente sobre el disco y el mango mientras esta o la otra mano toca la jaula externa.
- c) Introducir las placas de carga en la jaula, una por vez, a unos 2 cm del fondo sin tocarla y verificar lectura del instrumento.
- d) Frotar breve y suavemente las placas de carga entre sí e introducirlas sucesivamente en la jaula sin tocarla. Tomar lecturas.
- e) Introducir las dos placas de carga simultáneamente. Tomar lectura.
- f) Introducir una placa de carga y tocar el interior de la cubeta cerca del fondo, con la parte negra de la placa, que es conductora. Retirar la placa y tomar lectura. Descargar la cubeta tocando con un dedo los enrejados exterior e interior simultáneamente o bien presionando el botón de descarga del instrumento. Reingresar la misma placa sin tocar y tomar lectura.
- g) Repetir el paso f) con la otra placa.
- h) Introducir a la cubeta las dos placas descargadas y manteniéndose dentro, producir entre ambas un frotamiento breve y suave. Retirar una placa por vez tomando las lecturas del electrómetro.

*Figura 4*

### ***Descripción de los resultados obtenidos en la experiencia***

**Inducción Electrostática.** Cuando un objeto cargado se coloca en el interior de la jaula sin tocarla, el campo eléctrico que origina alrededor mueve las cargas en la jaula, de modo que aquellas de signo opuesto al de la carga en el objeto se mueven a la superficie interna y aquellas con igual signo se mueven a la superficie externa. Este movimiento de cargas ocurre hasta que la cantidad de cargas acumuladas en la superficie interior es tal que produce un campo eléctrico opuesto y de igual magnitud que el que produce el objeto en cada punto en el interior de los alambres de la jaula. En estas condiciones el campo es nulo en los puntos en el interior del conductor y se alcanzó el equilibrio electrostático. Por el principio de conservación de la carga, las cargas en la superficie exterior han de ser de igual magnitud que las cargas en la superficie interior, dando una carga neta nula en la jaula.

Una pequeña parte de las cargas acumuladas en la superficie exterior de la jaula fluyen a través del cable blindado hasta el circuito del electrómetro para producir la medida (pequeña porque la resistencia interna del electrómetro es alta).

Cuando el objeto cargado se retira, las cargas en la jaula se acomodan y no hay concentración en ninguna de las superficies (permanecerá con una pequeña carga neta del

signo opuesto al del objeto debido a la carga derivada por el cable blindado, pero es posible que debido a la humedad del ambiente esta carga se disipe en el aire).

**Carga por contacto.** Cuando la parte conductora del objeto cargado que se ingresa en la jaula se pone en contacto con la misma, pasa a formar parte de la jaula (tenemos un solo conductor con una cavidad). En estas condiciones, según lo que se obtiene por la ley de Gauss, en el equilibrio electrostático no hay acumulación de cargas en la superficie interior del conductor, y toda la carga excedente reside en la superficie exterior de la jaula. Luego, el objeto que inicialmente estaba cargado ahora está descargado y la jaula inicialmente descargada, ahora está cargada, siendo esta carga igual a la carga que pierde el objeto.

El electrómetro mide un potencial de la jaula respecto a tierra (respecto al escudo exterior) positivo si la carga acumulada en su superficie exterior es positiva, y negativa en el caso opuesto.

Tenemos que  $\mathbf{E} = -\nabla V$ . Luego, si la carga concentrada es positiva, podemos considerar que  $\mathbf{E}$  es radial hacia el exterior de la jaula, lo que implica que el potencial aumenta en esa dirección hacia el interior de la jaula, es decir, es menor en el escudo externo que en la jaula. En cambio, si la carga concentrada es negativa ocurre lo opuesto.

La diferencia de potencial que se mide entre las jaulas es proporcional a la carga acumulada en el exterior de la jaula interna, la cual es a su vez proporcional a la carga del objeto que se coloca en el interior. Luego la diferencia de potencial que se mide entre las placas es proporcional a la carga del objeto que se coloca en la jaula.

### ***Resultados obtenidos***

d) Al introducir las placas cargadas sucesivamente se obtuvo una lectura de 3V para la placa de material blanco y -3V para la placa de material azul (comprobándose la conservación de la carga).

Se deduce que:

- (1) La placa blanca tiene carga positiva ya que el potencial de la jaula es mayor que el potencial del escudo, lo que indica que la carga que se concentra en la superficie exterior de la misma es positiva, y esta debe ser del mismo signo que la carga de la placa.
- (2) La plaza azul tiene carga negativa.
- (3) En la serie triboeléctrica, el material de la placa azul está más abajo que el material de la placa blanca.

e) Al introducir ambas placas cargadas en el interior de la jaula la lectura del electrómetro es cero. Esto indica que no hay carga inducida en la jaula y esto se debe a que no hay carga neta encerrada en el interior de la jaula, lo cual tiene sentido ya que la carga de los objetos es la misma pero de signo opuesto.

f y g) Estas son las lecturas obtenidas por los estudiantes que realizaron el informe

Placa Azul	Placa Blanca
Tocando el interior: -5	Tocando el interior: 5
Sin tocar el interior: -5	Sin tocar el interior: 5

*Tabla 1*

Al tocar la jaula con el objeto, como se indicó antes, esta queda cargada con la carga del objeto y el objeto se descarga. Al retirar el objeto, la lectura del electrómetro indica la diferencia de potencial entre las jaulas debido a esta acumulación de cargas.



Según se indica en el inciso f) del procedimiento del experimento, luego de retirar la placa, realizar la lectura y descargar la jaula, la placa debe ser ingresada nuevamente, pero no se indica que deba ser frotada con la otra placa antes de volver a ingresarla. Si la placa no se frota antes de volver a ingresarla, es esperable que el electrómetro indique 0V según se explicó, o bien que la lectura del electrómetro indique que la carga en esta placa es menor que la que tenía inicialmente. Sin embargo, las lecturas que se obtienen en ambos casos para cada placa son las mismas, esto no tiene sentido y probablemente signifique que las placas fueron frotadas entre sí antes de volver a ingresarlas a la jaula (aunque también resulta raro que las tensiones que se obtienen son las mismas cuando se toca el interior y cuando se vuelve a ingresar la placa).

En el informe los estudiantes no indican que hayan cargado las placas nuevamente antes de realizar el inciso f) del procedimiento, de modo que es esperable que la carga que tienen las placas sea aproximadamente la misma que tenían cuando se realizaron las primeras lecturas. Dado que las lecturas en este caso son mayores que las obtenidas en el inciso d), esto puede indicar dos cosas: que las placas sí fueron frotadas nuevamente y esa es la razón de que se obtengan lecturas mayores, o bien que la carga que se induce en la jaula es menor que la que se acumula cuando se hace contacto con la placa.

h) En este caso se obtuvieron lecturas de 4V para la placa de color blanco, y de -4V para la placa de color azul. Nuevamente se comprueba la conservación de la carga.

### **Experiencia 2.3 - Potencial y Campo Eléctrico.**

El objetivo de esta experiencia es generar campos electrostáticos de distintas configuraciones y medir el potencial asociado en cada punto en un plano, lo que nos permitirá trazar las superficies equipotenciales (en este caso son curvas equipotenciales) y obtener el campo eléctrico en cada punto, pudiendo así visualizar “la forma” del campo.

Se recurre a un modelo plano para estudiar el campo electrostático generado por pares de cuerpos cargados. Este modelo consiste en una hoja rectangular de papel al carbón conductora en su superficie, que tiene una resistencia de entre  $5\text{ K}\Omega$  y  $20\text{ K}\Omega$  por  $\text{cm}^2$  (para producir un cortocircuito o una corriente muy elevada habría que dibujar objetos muy cercanos con una tensión entre ellos relativamente alta), el papel tiene una grilla con separaciones entre divisiones de 1 cm. En el papel se dibujan con tinta conductora de baja resistencia (que es una suspensión de partículas de plata en un medio líquido) la forma de los cuerpos.

Mediante una fuente de alimentación DC se establece una diferencia de potencial conocida entre los cuerpos dibujados, así queda establecido el campo eléctrico y el potencial eléctrico en cada punto en la superficie del papel. El potencial  $V$  en un punto de la hoja relativo al terminal de tierra de la fuente (conectado a alguno de los cuerpos) se obtiene por medición directa con un multímetro digital en función de voltímetro (que idealmente tiene una resistencia interna infinita), mientras que para la obtención del campo eléctrico  $\mathbf{E}$  en cada punto del plano se recurre a la relación:  $\mathbf{E} = -\nabla V$

#### ***Procedimiento del Experimento***

1. Con la lapicera que dispensa la tinta se dibujan en el papel la forma de los cuerpos, procurando que las líneas dibujadas sean sólidas y continuas.

2. Se coloca el papel de carbón sobre un tablero aislante (en la documentación del producto se indica que las hojas de carbón vienen acompañadas de un tablero de corcho para colocar el papel), se inserta un pin metálico en un punto en cada cuerpo que permitirá fijar mediante pinzas cocodrilos los terminales de la fuente de alimentación DC.

Con la fuente apagada se conecta el positivo de la fuente a uno de los cuerpos y GND al otro (la tensión aplicada entre los cuerpos es de 30VCD en el experimento realizado por los estudiantes).

3. Obtener curvas equipotenciales. El terminal común del multímetro se conecta a GND de la fuente, y con la otra punta en cada punto del plano se mide la tensión (por ejemplo, se puede medir y anotar la tensión entre un punto en cada cuadro en el papel y GND).

Se busca un conjunto de puntos para los cuales la tensión medida sea igual a un valor dado, luego estos puntos se marcan en una hoja de papel con un sistema de referencia xy, en la que están dibujados los cuerpos y su disposición en la hoja de carbón.

Finalmente se unen estos puntos con una línea continua.

4. Obtener  $\mathbf{E}$  en un punto. En un punto del plano  $P(x,y)$ , las componentes del campo  $\mathbf{E}$  son:

$$E_x = -\frac{\partial V}{\partial x} \quad ; \quad E_y = -\frac{\partial V}{\partial y}$$

Que se pueden aproximar como:

$$E_x \cong -\frac{\Delta V_x}{\Delta x} \quad E_y \cong -\frac{\Delta V_y}{\Delta y}$$

Para usar la aproximación de  $E_x$ , medimos la tensión  $V_1$  en el punto  $P_1(x_1, y)$  y la tensión  $V_2$  en el  $P_2(x_2, y)$ ; con  $x_1 < x < x_2$ . Los puntos  $P_1$  Y  $P_2$  con puntos cercanos a  $P$ ,

por ejemplo, se pueden medir las tensiones a un cm a cada lado del punto P en la dirección del eje x.

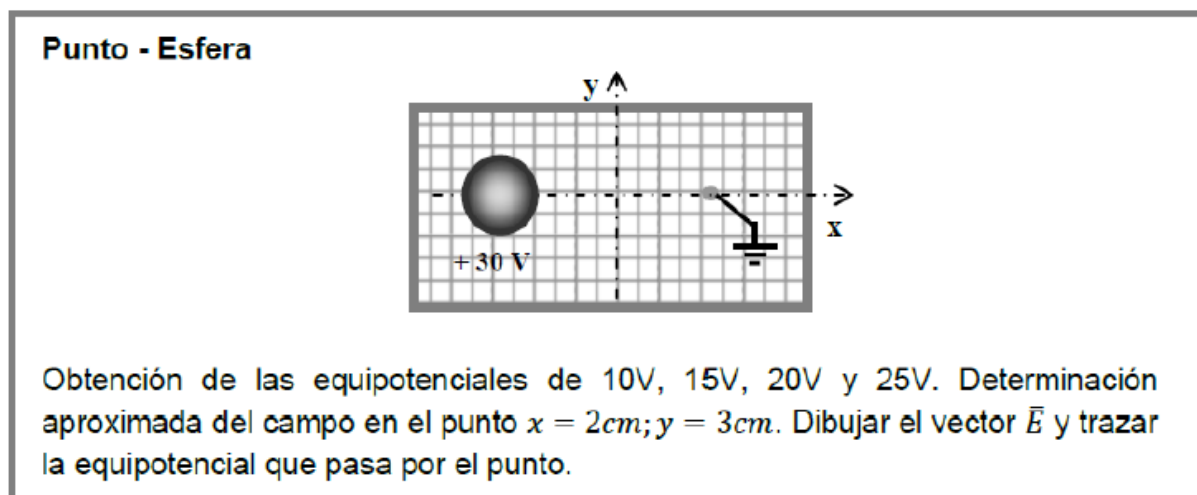
Para usar la aproximación de  $E_y$  medimos la tensión  $V_3$  en el punto  $P_3(x, y_3)$  y la tensión  $V_4$  en el  $P_4(x, y_4)$ , con  $y_3 < y < y_4$ . Los puntos  $P_3$  Y  $P_4$  con puntos cercanos a P, por ejemplo, se pueden medir las tensiones a un cm a cada lado del punto P en la dirección del eje y.

Entonces obtenemos:

$$E_x \cong -\frac{V_2 - V_1}{x_2 - x_1} \quad E_y \cong -\frac{V_4 - V_3}{y_4 - y_3}$$

Nota: No hace falta medir la tensión en cada punto, también es posible poner la punta común del multímetro en el punto  $P_1$  y medir la tensión del punto  $P_2$  respecto a  $P_1$  para obtener  $V_x$  y respectivamente para los puntos  $P_3$  y  $P_4$ .

La *Figura 5* indica la experiencia descrita en la guía



*Figura 5*

La *Figura 6* muestra la forma de las curvas equipotenciales obtenidas y el campo eléctrico en el punto solicitado.

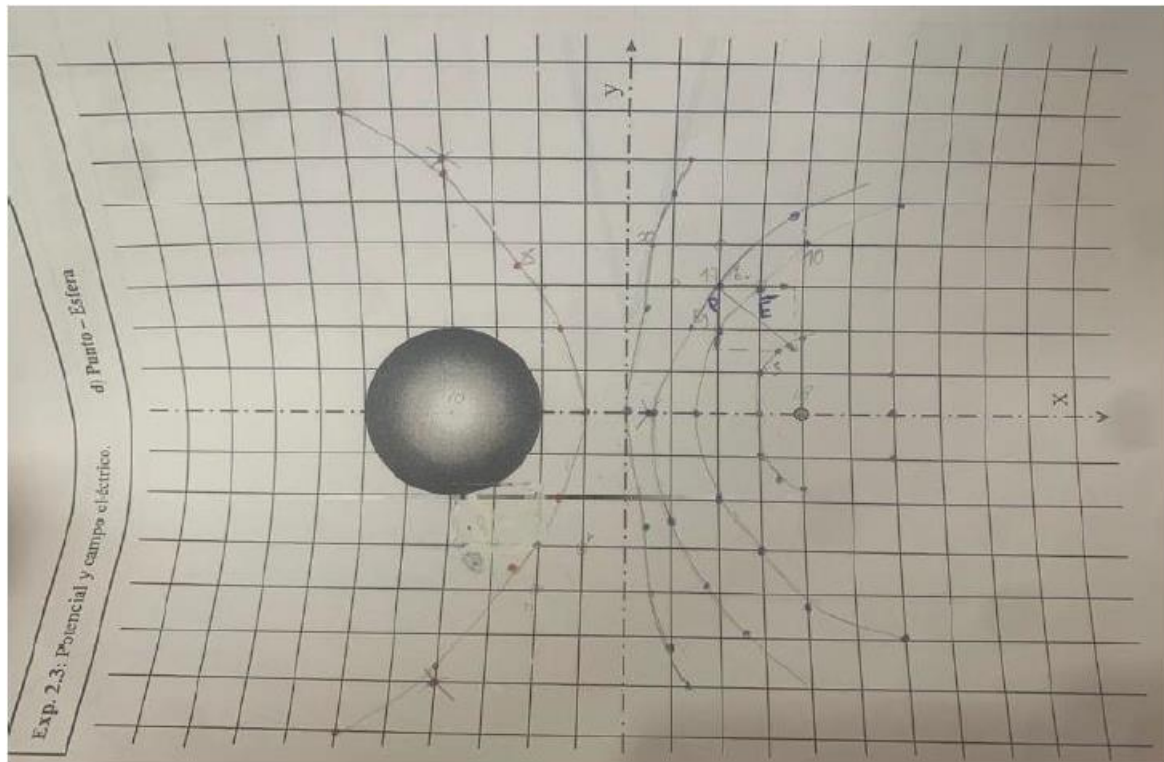
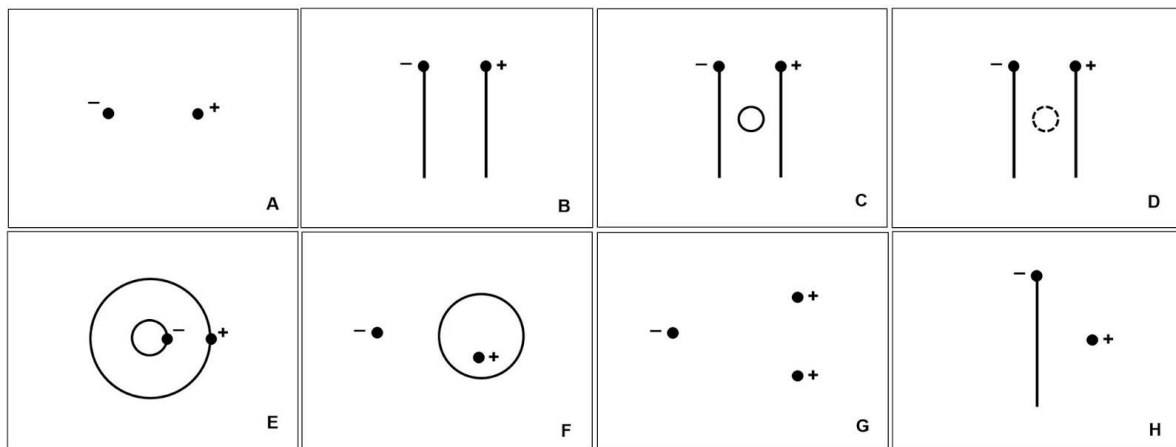


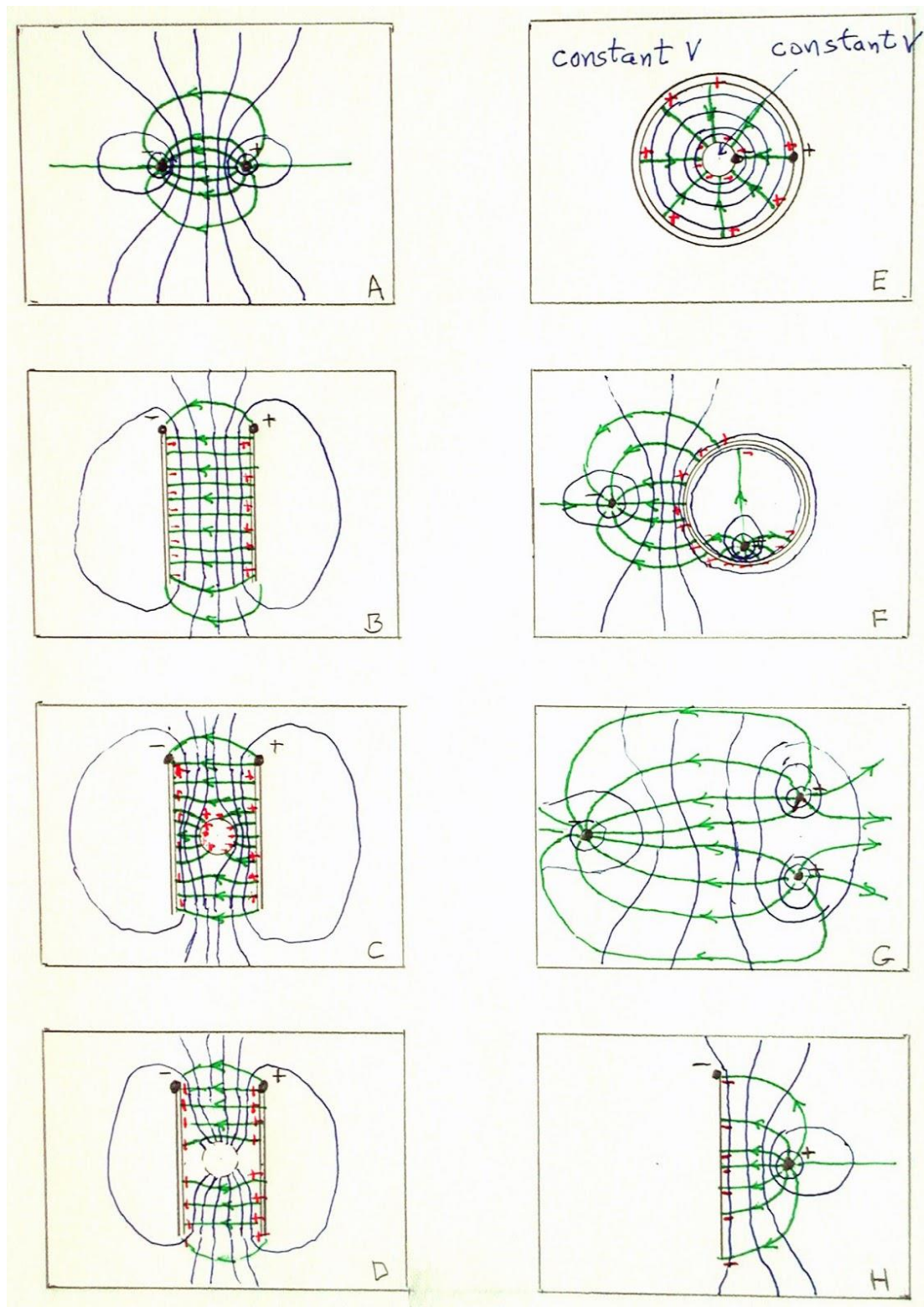
Figura 6

Se observa como las curvas de mayor potencial están más cerca de la esfera y el potencial decrece al acercarse al punto conectado a GND. Además, se observa que el vector aproximado  $\vec{E}$  en el punto P es perpendicular a la curva equipotencial que pasa por ese punto.

Las figuras siguientes (*Figura 7* y *Figura 8*) muestran diversos patrones que se pueden probar con el papel de carbón y los resultados obtenidos acerca de la forma de las curvas equipotenciales y las líneas de campo. Las imágenes fueron extraídas de la página de PASCO (<https://www.pasco.com/resources/lab-experiments/496>).

Al realizar la experiencia ellos utilizan un generador de señal con salida de 15VDC en lugar de una fuente, y para la medición de las tensiones utilizan un sensor de voltaje. Para probar con el patrón G utilizan una segunda salida del generador de señal a la misma tensión respecto a GND.

*Figura 7*

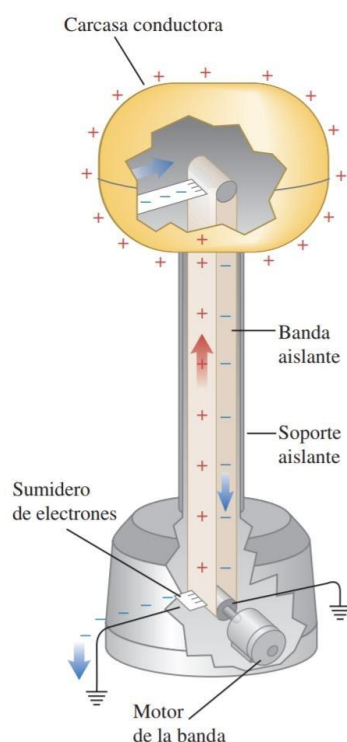
*Figura 8*

En esta imagen, las líneas de campo están representadas en color verde, mientras que las líneas equipotenciales están representadas en color azul.

### Experiencia 2.4 - Generador Electrostático de Van de Graaff.

Un Generador de Van de Graaff es una máquina electrostática que permite producir diferencias de potencial muy altas debido a que acumula una gran cantidad de cargas positivas o negativas en una superficie metálica esférica. El generador de Van de Graaff mostrado en la *Figura 9* permite producir diferencias de potencial de hasta 100 KV.

#### *Descripción de las Partes del Generador*



*Figura 9*

En la *Figura 9* se pueden observar las siguientes partes.

En el casquete metálico de la parte superior se acumulan las cargas eléctricas. El casquete está unido a un soporte aislante que se asienta en la base de la máquina. Una banda o correa de goma (no conductora) que cumple la función de transportar las cargas al interior del casquete se mueve entre dos poleas cilíndricas. La polea inferior es una polea motora accionada por un motor o de forma manual con una manivela y la polea superior es una polea

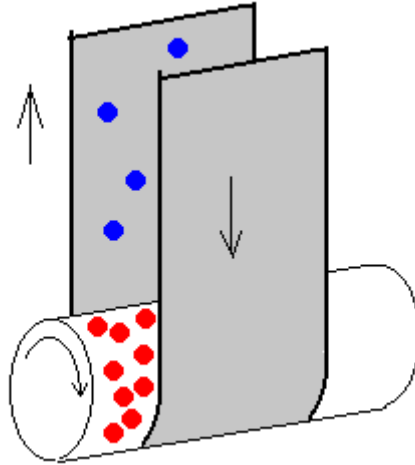


libre. Dos electrodos metálicos con terminación en forma de cepillo o con puntas muy finas se encuentran uno en el interior del casquete en contacto con este, y el otro en la parte inferior conectado a GND, ambos se ubican a corta distancia de la banda transportadora a la altura del eje de la polea correspondiente.

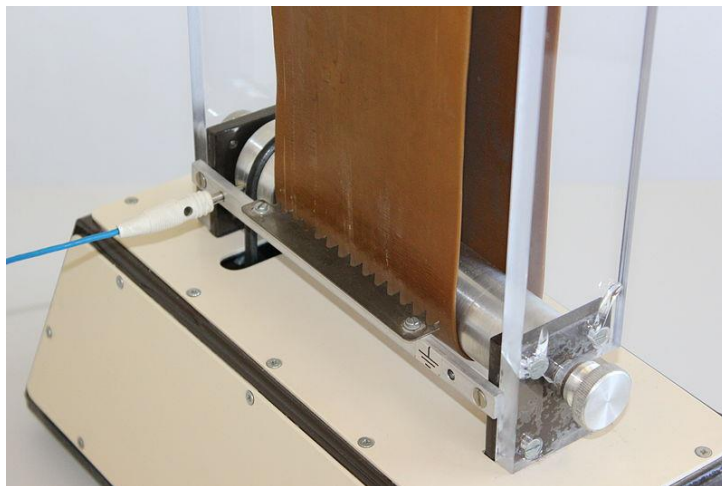
### ***Descripción del Funcionamiento***

Cuando la polea inferior está en rotación y mueve a la banda transportadora, dado que estos están hechos de materiales distintos (y se acercan, alejan y se frotan), hay una transferencia de cargas eléctricas de acuerdo al fenómeno triboeléctrico y el signo de la carga que adquiera la polea y la banda dependen de la posición que ocupen en la serie triboeléctrica. Si consideramos que la polea es de aluminio y la banda es de goma sintética, entonces en el movimiento la polea adquiere carga positiva mientras que la banda de goma se carga negativamente. Aunque las cargas en cada parte son de igual magnitud y de signos opuestos, esta carga está más distribuida en la banda que en la polea y por lo tanto es mayor la densidad de carga en la superficie de la polea, así se obtiene en el exterior un potencial positivo debido a la carga positiva en la polea de aluminio.

En la *Figura 10* se muestra esto (los puntos rojos indican cargas positivas y los puntos azules cargas negativas):

*Figura 10*

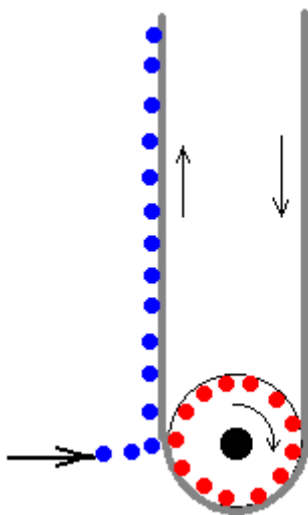
La *Imagen 4* permite observar la forma del peine y la separación entre este y la banda transportadora.

*Imagen 4*

Debido al campo eléctrico que produce la polea, cargas eléctricas del signo opuesto se acumulan en las puntas del peine (en este caso son cargas negativas y las cargas positivas se derivan a tierra). Como se observó, la separación entre las puntas del peine y la banda es pequeña y la curvatura de las puntas es pequeña también, como consecuencia, una pequeña acumulación de cargas en las puntas del peine ocasionan una diferencia de potencial entre la polea y el peine que es suficiente para romper el dieléctrico del aire y el aire alrededor se

ioniza (es el efecto puntas). Dada la orientación del campo, las cargas eléctricas negativas libres en el aire y en el peine se acercan a la polea, pero se encuentran con la banda de goma que las retiene, luego son transportadas al interior del casquete.

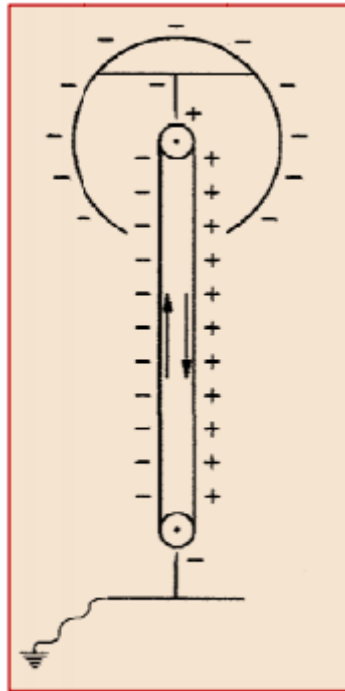
La *Figura 11* muestra esto de forma esquemática (la flecha indica las puntas del peine).



*Figura 11*

En el interior del casquete el proceso que ocurre es inverso. En este caso, las cargas eléctricas negativas transportadas por la banda deben pasar al peine colector, para conseguir esto la polea superior debe ser de un material tal que se cargue negativamente por contacto con la goma (esto se puede conseguir con una polea recubierta con teflón, por ejemplo). Así, se produce un campo eléctrico por la acumulación de cargas negativas en la polea (por efecto triboeléctrico en el contacto entre la polea y la banda), cargas positivas del casquete se acumulan en las puntas del peine, el aire se ioniza y las cargas negativas transportadas por la banda pasan al peine, a su vez cargas positivas del casquete saltan a la banda y son enviadas a la polea inferior. Las cargas negativas que pasan al peine no permanecen en él, se distribuyen completamente en la superficie exterior del casquete, ya que en un conductor en equilibrio electrostático toda su carga reside en el exterior según se deduce por la Ley de Gauss.

La *Figura 12* resume la explicación.



*Figura 12*

Con la configuración de polea inferior de aluminio y polea superior recubierta de teflón se consigue un casquete cargado negativamente, pero si lo que se quiere obtener en la superficie del casquete son cargas positivas, entonces basta con cambiar el cilindro superior por el inferior.

Al final de la siguiente página se puede observar el funcionamiento del generador de Van de Graaff, con las cargas positivas de color rojo, y las cargas negativas no son visibles.

Además, nos da una idea de cómo aumentan la carga y la potencia

[http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/electrico/conductor/conductor\\_1.html](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/electrico/conductor/conductor_1.html).

Puede observarse en el link anterior el máximo potencial que puede haber en la superficie de la esfera antes de que se rompa el dieléctrico del aire suponiendo que el casquete sea perfectamente esférico.

Su alto potencial eléctrico se debe a que el generador de Van de Graaff usa un casquete esférico con radio muy grande, gracias a esto es capaz de soportar campos aún más grandes sin volverse conductor. La ecuación del máximo potencial eléctrico que se puede aplicar en un conductor esférico viene dado por:

$$V_m = RE_m$$

Donde  $V_m$  es el máximo potencial eléctrico,  $R$  es el radio de del conductor esférico, y  $E_m$  la magnitud de campo eléctrico a la que el aire se vuelve conductor ( $3 \times 10^6 \text{V/m}$ ).

### *Experimentos con el generador*

**Carga y Descarga de Piezas Metálicas por Inducción y Contacto.** Acercamos al casquete un disco metálico, del espacio entre ellos saltarán chispas, pero además depende de su ubicación. Si acercamos el disco a los costados del casquete saltarán chispas con más fuerza, pero menos frecuentes, si lo acercamos al tornillo en lo superior del casquete estas chispas serán más débiles, pero saltarán más fácilmente.

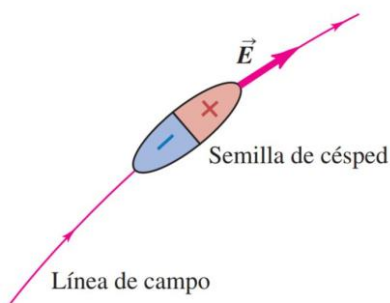
**Efectos de Atracción y Repulsión.** Al acercar al casquete un material conductor (como una esfera de aluminio) se le transfiere la misma carga, al quedar ambos con la misma carga estos se van a repeler y el material conductor intentará alejarse del generador electrostático.

Cuando se le acerca un material conductor (como una esfera de telgopor) la esfera se polariza, porque lo intentará acercarse al generador, y hasta podría quedarse pegada a él. En un material aislante esto no sucede.

**Descarga de Tubos de Gas.** Un tubo de luz fluorescente tiene dentro un gas que se ioniza, cuando los iones golpean la superficie del tubo se emite luz. De esta manera, al acercar un tubo de gas al generador electrostático saltan chispas, de modo que se prenderá hasta donde lo sostengo, ya que mi mano actúa como puesta a tierra.

**Efecto de Puntas.** Cuando los conductores metálicos terminan en punta se produce una acumulación de carga en las zonas del material acabadas en punta donde su volumen es menor y se concentra mayor cantidad de carga. Esto lo podemos observar en el experimento anterior cuando el tubo toca el tornillo.

**Mostrar en el Plano la Forma de las Líneas de Campo.** En un recipiente con aceite aislante se colocaron semillas de césped, junto con electrodos metálicos, un borne conectado a tierra y el otro al tornillo del generador de Van de Graff. Las semillas de césped fuera de los electrodos se polarizan, generando un momento dipolar eléctrico, y se orientan como las líneas de campo eléctrico, como se muestra en la *Figura 13*; a las semillas que estaban dentro de los electrodos no les sucedió nada.



*Figura 13*

En el siguiente video podemos observar una experiencia similar con un generador electrostático casero: <https://www.youtube.com/watch?v=dtKeuPKcbYQ>

**Conclusión**

Este trabajo nos ha permitido notar como se cumplen las leyes de la electrostática mediante la visualización de experimentaciones que además nos han permitido estudiar más instrumentos utilizados en los laboratorios de física, tales como el generador de Van de Graaff, el electroscopio, el electrómetro, y la doble jaula de Faraday.

Nos brindó conocimientos sobre como medir potenciales eléctricos.

Nos permitió visualizar campos electrostáticos, equipotenciales y líneas de campo.