

# LEY DE COULOMB

## Objetivo:

Demostrar experimentalmente la Ley de Coulomb.

## Material:

- 1.- Balanza de Coulomb.
- 2.- Fuente de voltaje (0-6 KV).
- 3.- Jaula de Faraday.
- 4.- Electrómetro.

## Introducción:

La balanza de Coulomb es una balanza de tipo torsión muy sensible y delicada, que puede usarse para investigar la fuerza eléctrica entre objetos cargados. Una esfera conductiva se monta sobre un soporte y se suspende, contrabalanceada, de un hilo de torsión muy delgado. Por su parte, otra esfera idéntica se monta sobre un ensamblaje deslizable tal que puede variarse la distancia con respecto a la esfera suspendida.

Para realizar este experimento ambas esferas se cargan, y la esfera montada sobre el ensamblaje deslizable se coloca a distancias fijas partir de la posición de equilibrio de la esfera suspendida. Aquí la fuerza eléctrica (que suele llamarse fuerza electrostática) entre las esferas provoca una torsión sobre el hilo. Entonces, si se tuerce el hilo para llevarlo nuevamente a su posición de equilibrio, el ángulo necesario para lograr esto será directamente proporcional a la fuerza electrostática entre las esferas.

Todos los parámetros en la ecuación de Coulomb  $\left( F = K \frac{q_1 q_2}{r^2} \right)$  pueden variarse y medirse empleando la balanza de Coulomb.

## A) FUERZA VS. DISTANCIA

### Procedimiento:

1. Arma la balanza de Coulomb.
2. Asegura que las esferas estén completamente descargadas (para esto tócalas con algún conector que este a tierra) y mueve la esfera que se desliza lo más lejos de la otra que está suspendida.

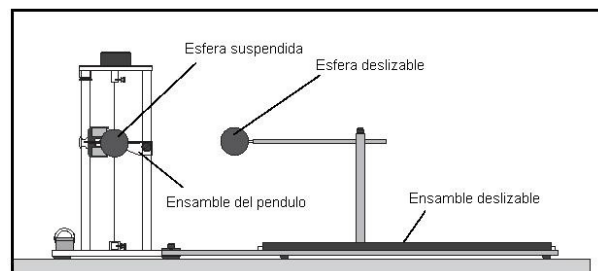


Figura 1. Configuración del equipo

Establece la tensión a 0-C. Coloca a cero la balanza de torsión apropiadamente rotando el sujetador de alambre hasta que el ensamblaje del péndulo está en su posición cero según lo indicado por las marcas.

3. Teniendo las esferas una separación máxima carga ambas esferas con un potencial de 6 KV usando el probador de carga (una terminal de la fuente debe estar a tierra). Inmediatamente después de cargar las esferas, apaga la fuente para evitar efectos de alto voltaje.
4. Coloca la esfera deslizable a una posición de 20 cm. Ajusta la perilla de torsión lo necesario para balancear la fuerza y ponga el péndulo de nuevo a la posición cero. Registra la distancia ( $r$ ) y en ángulo ( $\theta$ ) en la tabla 1.
5. Coloca las esferas a su máxima separación, recárgalas con el mismo voltaje, después vuelve a colocar la esfera deslizable a una separación de 20 cm. Mide el ángulo de torsión y registra el nuevo resultado. Repite esta medición varias veces, hasta que tus resultados estén dentro de  $\pm 1^\circ$ . Registra todos tus resultados.
6. Repite los pasos del 3 al 5, para 14, 10, 9, 8, 7, 6 y 5 cm.

### **Análisis:**

*NOTA: En esta parte del experimento, se supone que la fuerza es proporcional al ángulo de torsión. Si se realiza el experimento de la parte C, podrás comprobar esto cuando calibres la balanza de torsión*

Determina la relación funcional entre la fuerza, la cuál es proporcional al ángulo de torsión ( $\theta$ ), y la distancia ( $r$ ). Esto puede realizarse de la siguiente forma:

1. Grafica el  $\log \theta$  vs.  $\log r$   
Explicación: Si  $\theta = br^n$ , donde  $b$  y  $n$  son constantes desconocidas, entonces el  $\log \theta = n \log r + \log b$ . La pendiente de la gráfica de  $\log \theta$  vs.  $\log r$  será una línea recta. Esta pendiente será igual a  $n$ , y esta intercepta en el eje  $y$ , donde es igual a  $\log b$ . Por lo tanto, si la gráfica es una línea recta la función estará determinada.
2. Grafica  $\theta$  vs.  $r^2$ .  
Cualquiera de estos métodos demuestra que, para valores relativamente grandes de  $r$ , la fuerza es proporcional a  $1/r^2$ . Para valores pequeños de  $r$  al menos esta relación no se mantiene.

### **Correcciones en los datos**

La razón de la desviación observada, de la inversa cuadrática, para distancias cortas es que las esferas cargadas no son simplemente cargas puntuales. Una esfera conductiva cargada, si está aislada de otra influencia electrostática, actúa como una carga puntual. Las cargas se distribuyen uniformemente en la superficie de la esfera, de modo que el centro de la distribución de carga es solo el centro de la esfera. Sin embargo, cuando dos esferas cargadas están separadas por una distancia que no es mayor al tamaño de las esferas, la carga se redistribuirá en las esferas reduciendo al mínimo la energía electrostática. La fuerza entre las esferas por lo tanto será menor que si las esferas cargadas fueran sólo cargas puntuales.

Un factor de corrección **B**, puede ser usado para corregir esta desviación. Simplemente multiplique cada valor de  $\theta$  por  $1/B$ , donde:

$$B = 1 - 4 \frac{a^3}{r^3},$$

donde  $a$  es el radio de la esfera y  $r$  es la separación entre dichas esferas.

Para corregir los datos:

1. Calcula el factor de corrección **B** para cada una de las separaciones de  $r$  que se utilizó. Registra sus datos en la tabla 1.
2. Multiplica cada valor de  $\theta$  por  $1/B$  y registra el resultado como  $\theta_{\text{corregido}}$
3. Vuelve a graficar la fuerza y separación, pero esta vez utiliza  $\theta_{\text{corregido}}$  en vez de  $\theta$  ¿Cómo afecta el factor de corrección?

## B) FUERZA VS. CARGA

**Procedimiento:**

Con la separación ( $r$ ) constante (elija un valor entre 7 y 10 cm), carga las esferas con diferentes valores y mide la fuerza resultante. Mantén la carga de una esfera constante y varía la carga sobre la otra. Después grafica el ángulo vs carga para determinar la relación que existe

La carga puede variarse usando uno de los siguientes métodos:

**Método I:**

Si la fuente de poder es ajustable, simplemente carga la esfera a diferentes potenciales, como 6, 5, 4 y 3 KV. Cuando cargues las esferas, éstas deben tener su máxima separación. La carga sobre la esfera es proporcional al potencial de carga.

**Método II:**

Si la fuente de poder no es ajustable, la carga puede cambiarse tocando una o ambas esferas, con otra idéntica que esté descargada. La carga se distribuirá igualmente entre la esfera cargada y la descargada. Por lo tanto, toca la esfera cargada una vez para reducir la carga a la mitad, para reducirla a  $\frac{1}{4}$  tócala dos veces, etc.

## C) CONSTANTE DE COULOMB

**Procedimiento:**

En la parte A y B, se determinó que la fuerza electrostática entre dos cargas puntuales es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre las cargas y directamente proporcionales a la carga de cada esfera. Esta relación se indica matemáticamente por la Ley de Coulomb:

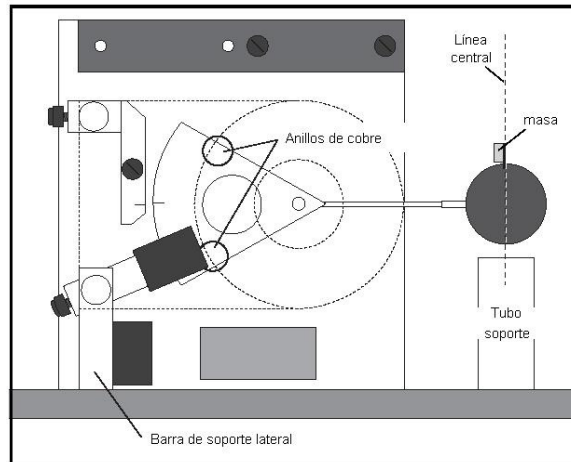
$$F = K \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

donde  $F$  es la fuerza electrostática,  $q_1$  y  $q_2$  son las cargas, y  $r$  es la distancia entre estas.

Para terminar el análisis con esta ecuación, se necesita determinar el valor de la constante de Coulomb  $K$ . Para lograr esto, debes medir tres variables adicionales: la constante de torsión del alambre ( $\kappa_{\text{tor}}$ ), para convertir los ángulos de torsión en medidas de fuerza, y las cargas,  $q_1$  y  $q_2$ . Así conociendo  $F$ ,  $q_1$ ,  $q_2$  y  $r$ , se puede determinar la constante  $\kappa_{\text{tor}}$ .

**Midiendo la constante de torsión,  $\kappa_{\text{tor}}$ .**

1. Con mucho cuidado, gira la balanza de torsión sobre un lado utilizando la barra lateral, como se muestra en la figura 2. Coloca el soporte en forma de tubo bajo la esfera, como se muestra.



**Figura 2. Calibración de la balanza de torsión**

2. Coloca a cero la balanza de torsión rotando el dial de torsión hasta que se alinean las líneas del indicador. Registra el ángulo de la placa del grado en la tabla 2.
3. Cuidadosamente coloca los 20 mg. de masa sobre la línea central de la esfera conductora.
4. Ajusta la perilla de torsión para traer las líneas del indicador nuevamente dentro de la alineación. Lee el ángulo de torsión en la escala graduada y registra el ángulo en la tabla 2.
5. Repite los pasos 3 y 4, usando las dos masas de 20 mg y la masa de 50 mg para aplicar cada uno de las masas mostradas en la tabla. En cada medición registra la masa y el ángulo de torsión obtenido.
6. Completa la tabla como sigue para determinar la constante de torsión del alambre:
  - a. Calcula el peso de cada conjunto de masas que se utilizaron.
  - b. Divide el peso por el ángulo de torsión para determinar la constante de torsión para cada peso.
  - c. Realiza un promedio con las constantes de torsión,

**NOTA:** Una constante de torsión para un alambre expresa generalmente el esfuerzo de torsión (torca) requerido para torcer el alambre una unidad de ángulo y normalmente se expresa en  $N$

$m/^\circ$ . Sin embargo, al usar la balanza de torsión, el brazo de la torca es siempre igual (la distancia del centro de la esfera conductora al alambre de la torsión), así que la constante de torsión para la balanza se expresa más convenientemente en  $N/^\circ$ .

## Medición de las cargas $q_1$ y $q_2$ .

### Método I:

La capacitancia de una esfera aislada esta dada por la ecuación:

$$C = 4\pi\epsilon_0 a$$

donde  $C$  es la capacitancia,  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  F/m, y  $a$  es el radio de la esfera.

Para un capacitor, la carga ( $q$ ) y el potencial de carga ( $V$ ) están relacionados por la ecuación:  $q = CV$ . Esta ecuación nos permitirá determinar la carga sobre las esferas del potencial al que se cargaron dichas esferas.

*NOTA: Un capacitor normalmente consiste de dos conductores. La carga de un conductor es  $+q$  y la carga del otro es  $-q$ .  $V$  es la diferencia de potencial entre los dos conductores. Para una esfera aislada con una carga  $+q$ , el segundo conductor es un plano hipotético con un potencial a tierra y con carga  $-q$ , localizado a una distancia infinitamente lejos de la esfera.*

### Método II:

La carga sobre las esferas puede medirse con más exactitud usando un electrómetro con una jaula de Faraday. Las conexiones se muestran en la figura 3. El electrómetro y la jaula de Faraday pueden ser considerados como un voltímetro de impedancia infinita en paralelo con un capacitor. Una esfera con una carga  $q$  se toca con la jaula. Desde ese momento la capacitancia de la jaula y el electrómetro es mayor que la esfera, virtualmente toda la carga  $q$  es transferida a la jaula.

La relación entre la lectura de voltaje del electrómetro y la carga depositada en el sistema está dada por la ecuación  $q = C V$ , donde  $C$  es la capacitancia combinada del electrómetro, la jaula de Faraday y los cables que conectan a este. Por lo tanto, para determinar la carga se debe conocer la capacitancia del sistema.

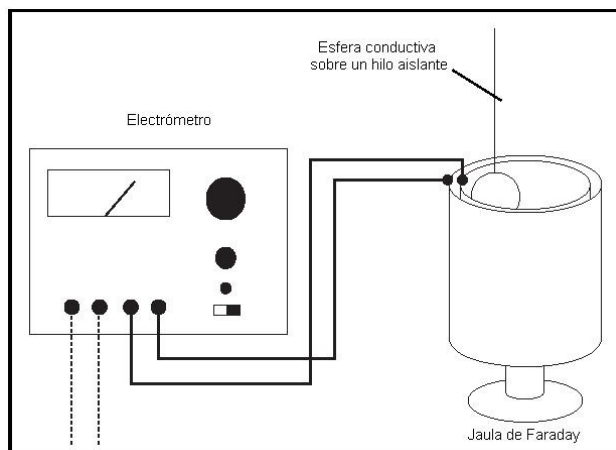


Figura 3. Medición de la carga con un electrómetro y la jaula de Faraday.

La forma más simple de medir la capacitancia del electrómetro y la jaula de Faraday es utilizar un buen medidor de capacitancia conectado entre los conductores interiores y exteriores de la jaula (el electrómetro debe estar conectado a la jaula durante la medición).

Un segundo método es cargar un capacitor de precisión con capacitancia igual a  $C_{test}$  (250 pF) a un voltaje conocido  $V_{test}$  (10-30 V). La carga sobre el capacitor es entonces igual a  $q_{test} = C_{test} V_{test}$ . Poniendo las terminales del capacitor cargado entre los conductores interiores y exteriores de la jaula. La carga  $q_{test}$  ahora se distribuye sobre los dos capacitores en paralelo, estos son el capacitor de precisión, la capacitancia de la jaula y el electrómetro.

Por lo tanto:  $C_{test}V_{test} = (C + C_{test}) V$ , donde  $C$  es la capacitancia del electrómetro y la jaula, y  $V$  es el voltaje obtenido del electrómetro. Además:  $C = C_{test} (V_{test} - V)/V$ . Una vez que haya medido la capacitancia, mide la carga de la esfera como sigue:

Descarga la esfera que está sobre el hilo aislado tocándola con una punta de prueba puesta a tierra.

Sosteniendo la esfera por el hilo aislante toca a la esfera cargada, y después toca el conductor interior de la jaula.

La carga en la esfera cargada original,  $q$ , puede ahora determinarse usando la ecuación:  $q = 2CV$ , donde  $C$  es la capacitancia del electrómetro y la jaula,  $V$  es la lectura en el electrómetro. El factor de dos se debe a que al usar la esfera de prueba para muestrear la carga sobre la esfera original, sólo la mitad de la carga original fue transferida.

#### Cálculos de la constante de Coulomb

La constante de Coulomb ahora puede determinarse usando algún par de datos de los datos de fuerza vs distancia.

Convierte el ángulo de torsión ( $\theta_{correctada}$ ) a fuerza usando la constante de torsión medida para el alambre de torsión:  $F = k_{tor} \theta_{correctada}$ .

Determina la carga que estaba en la esfera usando el método I o II. Si utilizaste el método II, se necesitará recargar la esfera al voltaje usado previamente mientras se toman los datos. Así se puede determinar la carga usando el electrómetro y la jaula de Faraday.

Sustituye los datos en la ecuación de Coulomb, y determina el valor de  $k$ . Haz esto para varios conjuntos de datos y promedia los resultados para determinar un valor para  $k$ .

$\theta$	R	$\theta_{promedio}$	B	$\theta_{correctada}$	$1/R^2$

Tabla 1. Fuerza vs. Distancia.

<b>m</b>	<b><math>\theta</math></b>	<b>mg</b>	<b>mg/<math>\theta</math></b>
<b>0 mg</b>			
<b>20 mg</b>			
<b>40 mg</b>			
<b>50 mg</b>			
<b>70 mg</b>			

**Tabla 2. Calibración de la fuerza, datos y cálculos.**

**Constante de torsión =  $K_{tor}$  = \_\_\_\_\_**

<b>C (capacitancia del electrómetro) =</b>	
<b>V (Voltaje del electrómetro) =</b>	
<b>Q (carga sobre la esfera) = <math>2 CV</math> =</b>	

**Tabla 3. Carga sobre la esfera.**