



**ELECTROMAGNETISMO**  
SIN (DEMASIADAS)  
VUELTAS

**LAURA ESTRADA**





**ELECTROMAGNETISMO**  
SIN (DEMASIADAS)  
VUELTAS

**LAURA ESTRADA**



Estrada, Laura

Electromagnetismo sin -demasiadas- vueltas / Laura Estrada. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Eudeba, 2022.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga

ISBN 978-950-23-3276-5

1. Física. 2. Ejercicios. 3. Electromagnetismo. I. Título.

CDD 530.141



Eudeba

Universidad de Buenos Aires

Primera edición: octubre de 2022

© 2022

Editorial Universitaria de Buenos Aires

Sociedad de Economía Mixta

Av. Rivadavia 1571/73 (1033) Ciudad de Buenos Aires

Tel: 4383-8025 / Fax: 4383-2202

[www.eudeba.com.ar](http://www.eudeba.com.ar)

Diseño de tapa: Sue Takahashi

Corrección y composición general: Eudeba

Impreso en Argentina

Hecho el depósito que establece la ley 11.723



No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni su almacenamiento en un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, electrónico, mecánico, fotocopia u otros métodos, sin el permiso previo del editor.

# Agradecimientos

Este libro empezó a gestarse en abril del 2020, cuando comenzaba un año académico totalmente inédito e incierto. Surgió de la necesidad personal de organizar toda la información de las clases en el pizarrón en algún formato que permitiera que las y los estudiantes pudieran acceder a ella en el momento en que les fuera más cómodo. No me resultaba nada obvio que iba a poder contar con la atención de mis estudiantes en las bandas horarias establecidas para un cuatrimestre “normal”, porque lejos estábamos de tiempos normales.

Poco a poco, fui elaborando cada uno de los episodios que hoy constituyen este libro. Fue un trabajo difícilísimo y de muchas muchas horas, casi agotador. Fue complicado anticipar que cada clase de dos horas de pizarrón significaría más de quince horas de digitalización para lograr una primera versión escrita. Hoy estoy feliz de ver este libro que me llena de alegría.

En primer lugar, quisiera agradecer a Lorena Rela, quien actuó como correctora científica. Su lectura crítica y minuciosa, así como muchas de sus preguntas, ayudaron a que este libro tenga la impronta que tiene. Que Lorena haya sido la correctora no es casual, pensé mucho en a quién proponer esta tarea. Lorena no solo tiene mucha experiencia trabajando en entender fenómenos bioeléctricos, sino que además está profundamente comprometida con una visión de la enseñanza de las ciencias con la que comulgo totalmente. Gracias, Lorena, por el fantástico trabajo.

En segundo lugar, quisiera agradecer a todo el equipo de Eudeba por confiar en mí desde un principio y ayudarme a sobrellevar cada uno de los desafíos que implicó la génesis de este libro. A Martina Barraza por comprender de manera instantánea a mis comentarios. A Omar Coso por ser la llave de este proyecto, sin su impulso inicial nada de esto hubiera sido posible.

No puedo dejar de agradecer a mi familia, quienes con su apoyo diario permiten que haga todo lo que hago.

Para el final dejé a mis estudiantes y a las y los auxiliares docentes que compartieron conmigo este camino por el electromagnetismo. Nada hubiera tenido sentido si no hubieran estado del otro lado. Fueron, sin saberlo, lxs editorxs y correctorxs por excelencia. ¡Gracias a ellxs!

Laura Estrada

# Índice

■ Episodio 1. Ley de Coulomb - Fuerza neta	9
■ Episodio 2. Flujo del campo eléctrico y ley de Gauss	19
■ Episodio 3. Fuentes y capacitores	33
■ Episodio 4. Corriente, resistencia, circuitos CC	47
■ Episodio 5. Circuitos equivalentes	67
■ Episodio 6. Circuitos RC	75
■ Episodio 7. Magnetostática y ley de Ampère	89
■ Episodio 8. Fuerza de Lorentz, ley de Faraday-Lenz	103
■ Cuestionario 1	119
■ Cuestionario 2	127



## Episodio 1

# Ley de Coulomb - Fuerza neta

### Objetivos

Hacer un primer acercamiento a los conceptos fundamentales de la electrostática. Construir a partir de los resultados experimentales de Coulomb un modelo para la fuerza entre dos cargas eléctricas estáticas, discutir el concepto de fuerza neta sobre una carga, introducir las primeras ideas de un campo vectorial.

La idea más importante de este episodio es el concepto de campo eléctrico como una perturbación en el espacio.

### Actividad 1

La ley de Coulomb es una **ley experimental** que mide (cuantifica) la interacción entre dos cargas eléctricas puntuales. En esta actividad vamos a jugar a ser el científico francés [Charles Coulomb](#) y redescubrir la ley que lleva su nombre. Para esto les propongo usar el simulador que encontrarán en [este enlace](#).

El simulador permite modificar cuatro parámetros: la magnitud (el valor) de cada carga, la distancia entre las cargas y la dirección relativa entre ellas. Como resultado arroja una flecha que indica la fuerza de interacción.

Realicen las siguientes actividades:

- **Fijen la distancia, la dirección relativa y el valor de una de las cargas. Aumenten el valor de la segunda carga**, registren el resultado de la fuerza para 10 valores diferentes. ¿Se animan a graficarlo? ¿Y si aumentan el valor de la otra carga? ¿A qué conclusión llegan respecto de la dependencia de la fuerza con la magnitud de las cargas involucradas?



#### PREGUNTAS CAPCIOSAS:

- ¿Por qué una flecha y no un número?

- **Fijen el valor de ambas cargas y la dirección. Aumenten el valor de la distancia de separación**, registren el resultado de la fuerza para 10 valores diferentes. ¿Se animan a graficarlo? ¿A qué conclusión llegan respecto de la dependencia de la fuerza con la distancia entre las cargas involucradas?
- Basados en los resultados obtenidos por ustedes (¡y por Coulomb!) escriban un modelo para la fuerza de interacción entre dos cargas eléctricas puntuales (fuerza de Coulomb). Si no se animan, busquen la expresión de Coulomb y verifiquen que la fuerza de Coulomb es consistente con los resultados obtenidos previamente usando el simulador. Muy importante, piensen en la flecha... ¿hacia dónde apunta? ¿Siempre? ¿De qué dependerá la dirección a la que apunta la flecha y qué significa? La fuerza **es un vector**, tiene por lo tanto módulo, dirección y sentido (para un repaso de vectores dejamos algunos ejercicios integradores). La fuerza será **repulsiva** (apuntará alejándose de la otra carga) **si ambas cargas tienen el mismo signo** y será **atractiva** (apuntará acercándose a la otra carga) **si ambas cargas tienen signo opuesto**.
- En el curso de Mecánica estudiaron la fuerza gravitatoria. Busquen esos apuntes y escriban, al lado de la expresión de la fuerza de Coulomb, la expresión de la fuerza gravitatoria. ¿Ya lo hicieron? ¡Epa! ¿Qué pasó? Compárenlas y hagan una lista (que contarán en el final) con similitudes y diferencias entre ambas leyes.

## Actividad 2

En la actividad anterior discutimos sobre la ley de Coulomb. Dijimos que era la ley hallada experimentalmente que permitía calcular la fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales estáticas (las cargas están fijas en el espacio). Antes de seguir avanzando, resumiremos varias cuestiones que son muy importantes acerca de esta fuerza.

La fuerza de Coulomb es un **vector** (y como tal tiene **módulo**, un tamaño de la flecha; **dirección y sentido**, es decir, la flecha apunta hacia algún lado).

La **dirección de la fuerza siempre está en la línea que une a ambas cargas**, y el **sentido de la fuerza depende de los signos de las cargas** (puede ser atractiva o repulsiva).

Juntando todo podemos escribir a la fuerza de Coulomb entre dos cargas puntuales estáticas  $q_1$  y  $q_2$  separadas una distancia  $r$  entre sí como:

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$$

donde  $k$  es una constante que depende del medio.

¿Cómo vamos hasta acá? Si hay dudas, ¡es momento de hacer una lista y discutir las con el docente!

La ley de Coulomb nos permite calcular la fuerza de interacción entre dos cargas aisladas. La verdad, la verdad: en la naturaleza es raro encontrar cargas aisladas, así que nos tenemos que animar a poner más cargas. ¿Qué pasa si tengo más de dos cargas y quiero calcular **la fuerza neta** (también llamada **fuerza resultante**) que una carga cualquiera siente debido a la presencia de **todas** las demás? Para esto les propongo empezar mirando [este apunte de Aula Fácil](#) que incluye un ejercicio resuelto.

Para calcular la fuerza neta (o resultante) sobre una carga debido a muchas otras, las fuerzas se pueden sumar. De este modo, la fuerza que la carga 1 siente debido a la presencia de las cargas 2, 3 y 4 será simplemente  $F_{1\leftarrow \text{todas las demás}} = F_{1\leftarrow 2} + F_{1\leftarrow 3} + F_{1\leftarrow 4}$ , donde la flechita indica claramente que  $F_{1\leftarrow 2}$  significa **la fuerza que la carga 2 le hace a la carga 1**. Esta importante propiedad de las fuerzas se conoce como principio de superposición y se utiliza en muchos campos de las ciencias.

Hasta acá el repaso. En esta nueva actividad vamos a discutir otro concepto importante (¡y bastante abstracto!), el concepto de **campo eléctrico**.

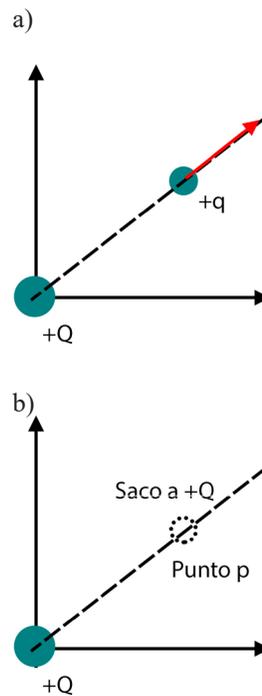
A partir de la ley de Coulomb ya vimos que, si tengo dos cargas eléctricas, digamos que a una la llamo  $+q$  y a otra  $+Q$  (ambas positivas para fijar ideas), aparecerá una flecha sobre  $+q$  que indica la fuerza que  $+Q$  le hace a  $+q$  y que se expresa como  $F_{q\leftarrow Q}$  (ver esquema a). También va a pasar la situación inversa. ¿Qué pasaría si por un momento eliminamos la carga  $+q$  que estaba situada en un punto  $p$  cualquiera del espacio (esquema b)? La sacamos de ahí. Es sensato pensar que en el punto en el que estaba  $+q$  tiene que “haber algo” tal que cuando pongo  $+q$  allí, ¡aparece una fuerza! Ese “algo” lo podemos pensar como una propiedad del espacio, que depende de la carga  $+Q$  y a la que llamaremos **campo eléctrico**,  $\vec{E}$ , **en el punto  $p$** .

Antes de seguir, pensemos algunas cuestiones:

En términos de expresiones matemáticas, ¿cómo escribimos lo que coloquialmente expresé como **eliminar la carga  $+q$** ? Observen la segunda ecuación del dibujo de arriba.

El campo eléctrico lo podemos pensar como la fuerza por unidad de carga. Y si es fuerza dividido carga, ¿será un vector o un escalar?

Esta propiedad de los puntos del espacio que aparece debido a la presencia **de una carga** la representaremos mediante **un vector** denominado **campo eléctrico**. La dirección y el sentido del vector



**Campo eléctrico** en el punto  $p$  del espacio

campo eléctrico en un punto cualquiera del espacio estarán dados por la dirección y el sentido de la fuerza de Coulomb, y eso es así simplemente porque definimos el campo eléctrico como la fuerza por unidad de carga:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

es decir, el vector fuerza dividido un escalar.

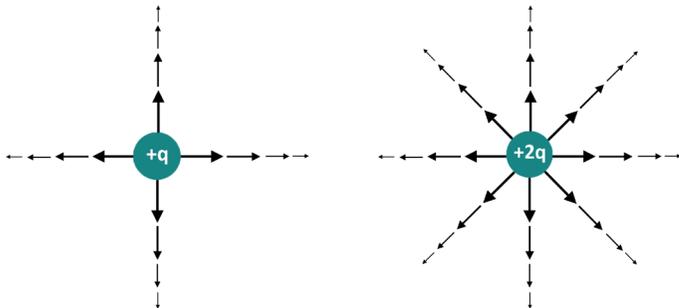
### Actividad 3

Para esquematizar las características del espacio debido a la presencia de cargas eléctricas, existe un método geométrico muy útil que consiste en dibujar líneas auxiliares que permitan visualizar cómo varía la dirección del campo eléctrico en el espacio. Las **líneas de campo**—así se llaman— indican la trayectoria que seguiría una **carga positiva** si se la dejara libre en un punto del espacio en el cual hay un campo eléctrico presente (y originado por otras cargas). Por lo tanto, si bien se llaman **líneas** de campo, solemos dibujarlas como **flechas** que tienen intensidad (largo de flecha), dirección y sentido.

Como habrán visto si hicieron los ejercicios propuestos, el campo eléctrico decae con la distancia a la partícula o al cuerpo cargado. Una manera de esquematizar eso es usando flechas cada vez más cortitas a medida que nos alejamos de la fuente del campo (ver dibujo debajo). Otra convención que vamos a usar en estos diagramas es la de dibujar más líneas si el campo es más grande. Por ejemplo, en el dibujo de abajo a la izquierda, el campo es generado por una carga  $+q$ , mientras que en el dibujo de la derecha está generado por el doble de carga. Para hacer notar eso, dibujamos el doble de líneas de campo.



ESTOS DIAGRAMAS SON MUY ÚTILES PORQUE PERMITEN DE MANERA RÁPIDA TENER UNA IDEA DEL CAMPO ELÉCTRICO EN TODO EL ESPACIO.



**Resumiendo:** Estos diagramas tienen un montón de información valiosa que surge a simple vista. Mirando cualquiera de ellos es posible ver la simetría del campo y ver que decae con la distancia. Comparando entre diagramas es posible concluir que el campo de la derecha está generado por el doble de carga que el campo de la izquierda (hay el doble de líneas dibujadas). Vamos a volver a la proporcionalidad entre la cantidad de líneas dibujadas y el campo eléctrico generado en el próximo episodio.



Para ganar intuición sobre cómo son los campos eléctricos (cómo dibujar las líneas de campo) vamos a usar el [simulador de la Universidad de Colorado en Boulder](#). El simulador permite hacer muchísimas cosas, y volveremos a él varias veces durante este curso. Permite ubicar en puntos cualesquiera del espacio una o más cargas, positivas o negativas, y graficar las líneas de campo eléctrico en dos modalidades: solo la dirección (todas las flechas en el mismo nivel de blanco), o la dirección y el módulo (las flechas tienen un degradé de color en vez de un largo de flecha, donde más blanco indica campo más intenso).

Realicen las siguientes actividades usando el simulador:

- Ubiquen **una única carga positiva en el centro de la pantalla**. Miren la distribución de las líneas de campo en todo el espacio (las flechas). Hagan un dibujo en sus cuadernos. Repitan el procedimiento, pero ahora ubicando **una única carga negativa en el centro de la pantalla**. En un caso las flechas apuntan hacia la carga y en el otro apuntan hacia afuera de la carga. ¿Por qué?
- ¡Vamos por más! **Pongan dos cargas en el espacio**. ¿Qué pueden decir de la distribución espacial de las líneas de campo? Exploren lo que sucede con las líneas de campo si ambas cargas tienen el mismo signo y si tienen signos contrarios. A la combinación de una carga positiva con una carga negativa se la conoce como **dipolo** eléctrico y es un modelo simple que aparece en muchas situaciones de la naturaleza. Dibujen las líneas de campo para el dipolo. ¿Cómo varían con la distancia entre las cargas?
- En la actividad 2 vimos que la fuerza neta sobre una carga de interés cualquiera debido a otras dos cargas podía calcularse sumando los vectores fuerza que cada carga hacía sobre la carga de interés. ¿Cómo creen que podremos calcular el campo eléctrico en todo punto del espacio debido a las dos cargas del dipolo? Ayuda: recuerden que el campo eléctrico, al igual que la fuerza de Coulomb, también es un vector. Piensen si las flechas que

obtienen con el simulador son consistentes con estar “sumando” vectores en cada punto del espacio. Ojo que está entre comillas el “sumando”... y eso es porque sumar dos vectores puede dar cero.

## Actividad 4

En la actividad anterior calculamos a partir de la fuerza de Coulomb el **campo eléctrico generado por unas pocas cargas puntuales**. Ahora quisiéramos extender el concepto de **campo eléctrico al generado por una distribución arbitraria continua de carga**. En palabras coloquiales, un objeto cargado cualquiera (una pelota, un hilo, un plano, cualquier cosa cargada eléctricamente) va a generar en el espacio circundante un campo eléctrico. Cómo calcular ese campo es lo que queremos aprender ahora. Para esto vamos a valernos de un concepto que ya nos es familiar: el principio de superposición.

Ya dijimos que era posible calcular el campo eléctrico generado por un conjunto finito de cargas a partir de sumar el campo que cada carga hacía en el punto del espacio de interés. Supongamos ahora que, en vez de tener un conjunto finito de cargas, tengo un cuerpo cargado, una pelota cuyo interior está completamente cargado por cargas +q (o -q). Siempre es posible pensar que ese volumen cargado está compuesto por pequeños pedacitos de pelota, tan pequeños que cada uno tiene una carga infinitesimal  $dq$  y, por lo tanto, va a generar un campo infinitesimal  $d\vec{E}$ . Calcular el campo eléctrico total (o resultante) se reduce simplemente a integrar, sobre todo el cuerpo cargado, cada una de las contribuciones infinitesimales  $d\vec{E}$ .

$$\vec{E} = \int_{\substack{\text{Todo} \\ \text{el cuerpo} \\ \text{cargado}}} d\vec{E} = \int_{\substack{\text{Todo} \\ \text{el cuerpo} \\ \text{cargado}}} \frac{k dq}{r^2} \hat{r}$$

donde en la última igualdad usé que el infinitesimal de campo eléctrico  $d\vec{E}$  debido al infinitesimal de carga  $dq$  es simplemente el que sale de aplicar Coulomb:

$$d\vec{E} = \frac{k dq}{r^2} \hat{r}$$

donde  $k = 1/4\pi\epsilon_0$  es una constante que depende del medio a partir de su permitividad eléctrica,  $\epsilon_0$ .