

# **FÍSICA 2º BACHILLERATO**

Manuel Sánchez Abián

2025-2026

# Índice

<b>1 Campo Gravitatorio</b>	<b>1</b>
1.1 Leyes de Kepler	1
1.1.1 Primera Ley de Kepler	1
1.1.2 Segunda Ley de Kepler	1
1.1.3 Tercera Ley de Kepler	2
1.2 Demostración de la Tercera Ley de Kepler	2
1.3 El Momento Angular de los Planetas	2
1.3.1 Teorema de Conservación del Momento Angular	2
1.4 Ley de Gravitación Universal	2
1.5 Campo Gravitatorio	3
1.6 Fuerzas Conservativas y Energías	4
1.6.1 Energía Potencial Gravitatoria	4
1.7 ¿Por qué la $E_p$ también es $m \cdot g \cdot h$ ?	4
1.7.1 Potencial Gravitatorio	4
1.7.2 Trabajo	4
1.8 Satélites	5
1.8.1 Velocidad Orbital	5
1.8.2 Satélites Geoestacionarios	5
1.8.3 Velocidad de Escape	5
1.8.4 Energía Mecánica de un Satélite en Órbita	5
1.8.5 Principio de Conservación de la Energía	5
1.9 Resumen de Fórmulas	7
<b>2 Campo Eléctrico</b>	<b>8</b>
2.1 Cargas Puntuales	8
2.1.1 Ley de Coulomb	8
2.1.2 Líneas de Campo Eléctrico	8
2.1.3 Intensidad del Campo Eléctrico	9
2.1.4 Principio de Superposición	9
2.2 Energías y Fuerzas Conservativas	9
2.2.1 Potencial Gravitatorio ( $V$ )	9
2.2.2 Trabajo ( $W$ )	9
2.3 Campos Eléctricos Uniformes	10
2.3.1 Líneas de Campo	10
2.3.2 Movimiento de Carga en Campo Uniforme	10
2.3.3 Campo: Láminas Infinitas	10
2.3.4 Campo: Hilo Infinito	11
2.4 Resumen de Fórmulas	12

<b>3</b>	<b>Campo Magnético</b>	<b>13</b>
3.1	Ley de Lorentz	13
3.2	Características del Movimiento	14
3.3	Cálculo de un Producto Vectorial	14
3.4	El Selector de Velocidades	15
3.5	Especrómetro de Masas	16
3.6	Ciclotrón	16
3.7	Resumen de Fórmulas	18

# 1. CAMPO GRAVITATORIO

## 1.1. LEYES DE KEPLER

Las leyes de Kepler son 3 leyes acerca de las **órbitas** de los **planetas** alrededor del Sol, que se deducen a partir de la ley de gravitación universal.

### 1.1.1. Primera Ley de Kepler

Los planetas describen **órbitas elípticas** alrededor del Sol. El sol está situado en uno de los **focos** de la elipse.

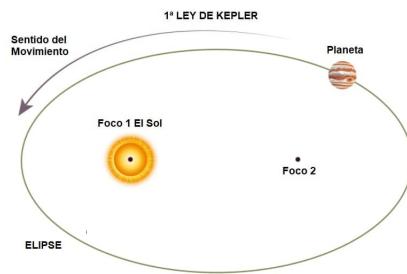


Figura 1: Primera Ley de Kepler

### 1.1.2. Segunda Ley de Kepler

Los planetas giran con una **velocidad areolar constante**, es decir, el vector posición (radiovector) barre áreas iguales en tiempos iguales:

$$\frac{dA}{dt} = \text{cte.}$$

Esto quiere decir que la velocidad en el **perihelio** (punto más cercano al Sol) es **mayor** que la velocidad en el **afelio** (punto más lejano al Sol).

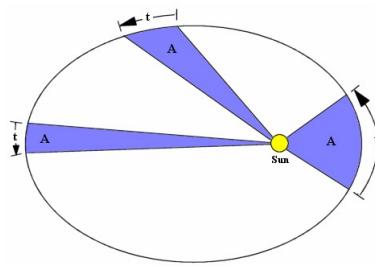


Figura 2: Segunda Ley de Kepler

### 1.1.3. Tercera Ley de Kepler

El **cuadrado** de los **periodos** ( $T$ ) alrededor del Sol es **proporcional** al **cubo** de los **radios** medios de sus órbitas ( $r$ ). Es decir:

$$T^2 = k \cdot r^3 \quad (1)$$

Siendo  $k$  una **constante** igual para **todos los planetas**.

## 1.2. DEMOSTRACIÓN DE LA TERCERA LEY DE KEPLER

$$\left. \begin{aligned} G \frac{Mm}{r^2} &= m \frac{v^2}{r} \implies v^2 = \frac{GM}{r} \\ T &= \frac{2\pi r}{v} \implies v^2 = \frac{4\pi^2 r^2}{T^2} \end{aligned} \right\} \frac{GM}{r} = \frac{4\pi^2 r^2}{T^2} \implies T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} r^3 \quad (2)$$

## 1.3. EL MOMENTO ANGULAR DE LOS PLANETAS

Cuando una partícula describe un movimiento curvilíneo, su estado de **movimiento** se caracteriza por su **momento angular** o momento cinético ( $\vec{L}$ ):

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = \vec{r} \times m\vec{v} \quad (3)$$

$$L = r \cdot m \cdot v \cdot \sin \alpha$$

### 1.3.1. Teorema de Conservación del Momento Angular

Fórmulas utilizadas:  $\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$ ,  $\vec{L} = \vec{r} \times m\vec{v}$ ,  $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$ ,  $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{d}{dt} (\vec{r} \times m\vec{v}) = m \left( \frac{d\vec{r}}{dt} \times \vec{v} + \vec{r} \times \frac{d\vec{v}}{dt} \right) = \vec{r} \times \vec{F} = \vec{M} \quad (4)$$

Si  $\vec{M} = 0 \implies \vec{L} = \text{cte.}$

## 1.4. LEY DE GRAVITACIÓN UNIVERSAL

Conocida como la ley gravitacional de Newton, se expresa el **valor** de la **fuerza de atracción** entre dos masas. La **dirección** del vector es la recta que une las dos partículas. Las **fuerzas** que interactúan entre dos masas tienen el mismo **módulo** y **dirección** pero distinto sentido.

$$\vec{F} = -G \frac{Mm}{r^2} \vec{u}_r \quad (5)$$

Donde la Constante de Gravitación Universal es  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

## 1.5. CAMPO GRAVITATORIO

El campo gravitatorio se define como la **perturbación** que la masa produce en el **espacio** que le **rodea** por el hecho de tener masa.

### I. LÍNEAS DE CAMPO GRAVITATORIO:

- a) Son **radiales** y van **dirigidos a la masa**.
- b) Son **tangentes** en cada punto al vector intensidad de campo y tienen su mismo sentido.
- c) No tienen **origen definido** (ya que el alcance del campo gravitatorio es infinito), pero terminan en puntos materiales denominados sumideros de campo.
- d) La **densidad** de líneas de campo es **proporcional** al módulo de la **intensidad** del campo.
- e) Las líneas de campo **no se pueden cortar**, ya que eso significaría que en un punto del espacio, el campo tendría dos valores distintos.

### II. INTENSIDAD DE CAMPO GRAVITATORIO ( $\vec{g}$ )

$$\vec{g} = -G \frac{M}{r^2} \vec{u}_r \implies g = G \frac{M}{r^2} \quad (6)$$

### III. PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN

- a) La intensidad del campo gravitatorio en un punto es la **suma vectorial** de los campos que crearía cada cuerpo aislado.
- b) De igual forma, la fuerza gravitatoria que siente una masa debido a otras masas será la **suma** de las fuerzas que cada una ejerzan:

$$\vec{F}_T = \sum \vec{F}_i \quad (7)$$

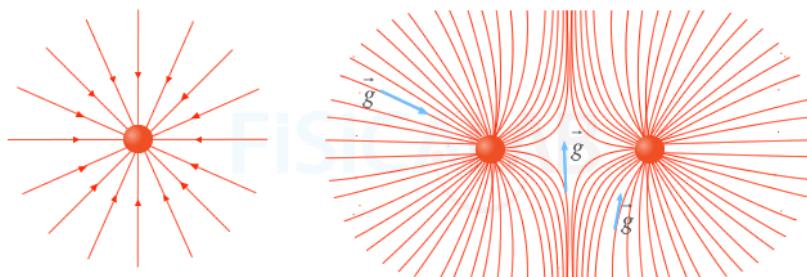


Figura 3: Líneas de Campo Gravitatorio

## 1.6. FUERZAS CONSERVATIVAS Y ENERGÍAS

Las **fuerzas** son **conservativas** cuando el trabajo que realiza dicha fuerza para trasladar una partícula de un punto A a otro B depende de los puntos inicial y final, pero **no** del camino **seguido**. En este caso, la **gravedad** es una fuerza **conservativa**.

### 1.6.1. Energía Potencial Gravitatoria

La energía potencial gravitatoria ( $E_p$ ) es aquella que posee una masa  $m$  por **encontrarse** bajo la **influencia** gravitatoria de otra masa  $M$  u otras masas. También puede definirse como el **trabajo** que realizaría el campo gravitatorio para **trasladar** una masa  $m$  desde un punto hasta el **infinito**.

$$E_p = -G \frac{Mm}{r} \quad (8)$$

## 1.7. ¿POR QUÉ LA $E_p$ TAMBIÉN ES $m \cdot g \cdot h$ ?

Con esta expresión, se asume que  $h \ll R_t$

$$\begin{aligned} \Delta E_p &= E_{pB} - E_{pA} = -G \frac{Mm}{R_t + h} + G \frac{Mm}{R_t} \\ &= GMm \left( \frac{1}{R_t} - \frac{1}{R_t + h} \right) = \frac{GMmh}{R_t(R_t + h \simeq R_t)} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\Delta E_p = \frac{GM}{R_t^2} mh = mgh \quad (10)$$

### 1.7.1. Potencial Gravitatorio

El potencial gravitatorio ( $V$ ) en un punto se define como la **energía potencial gravitatoria** por **unidad** de masa en dicho punto:

$$E_p = m \cdot V \implies V = -G \frac{M}{r} \quad (11)$$

### 1.7.2. Trabajo

Si  $W > 0$ , el trabajo lo realiza el **campo gravitatorio**. Si  $W < 0$  el trabajo lo realiza una **fuerza exterior al campo**. Si  $W = 0$  **no** se realiza **trabajo**. El trabajo para llevar una partícula de masa  $m$  desde un punto A hasta uno B será:

I.  $W_{A \rightarrow B} = -\Delta E_p$

II.  $W_{A \rightarrow B} = -m\Delta V$

## 1.8. SATÉLITES

### 1.8.1. Velocidad Orbital

Es la **velocidad necesaria** para que una masa  $m$  (como un satélite, tanto natural como artificial) describa una **órbita circular** alrededor de **otra  $M$** , para lo que la fuerza **centrípeta** debe ser **igual** que la fuerza **gravitatoria**.

$$G \frac{Mm}{r^2} = m \frac{v^2}{r} \implies v_{\text{orbital}} = \sqrt{\frac{GM}{r}} \quad (12)$$

### 1.8.2. Satélites Geoestacionarios

Se llaman **satélites geosíncronos** a aquellos satélites cuyo periodo de revolución coincide con el de la Tierra:  $T = 24\text{h} = 86400\text{s}$ . Si además estos satélites están todo el rato **sobre el mismo punto** de la superficie terrestre (para lo que es necesario que su plano orbital coincida con el ecuador) entonces se denominan **satélites geoestacionarios**.

### 1.8.3. Velocidad de Escape

La velocidad de escape es la velocidad mínima que debe adquirir un cuerpo para escapar de la **atracción gravitatoria del planeta** en cuyas **proximidades** se encuentre. Esto significa que  $E_p = 0$ ,  $E_c = 0$  y  $E_m = 0$ .

$$v_{\text{escape}} = \sqrt{\frac{2GM}{r}} = \sqrt{2} \cdot v_{\text{orbital}} \quad (13)$$

### 1.8.4. Energía Mecánica de un Satélite en Órbita

La energía mecánica de un satélite en órbita, también denominada energía orbital, es la **suma** de la energía **potencial** y **cinética**:

$$E_m = -G \frac{Mm}{2r} \quad (14)$$

### 1.8.5. Principio de Conservación de la Energía

Es la energía que debemos **comunicarle** a un satélite para que **pase** de una **órbita** a otra, donde las energías mecánicas son distintas.

$$W_{\text{com}} + E_{p_A} + E_{c_A} = E_{c_B} + E_{p_B} \quad (15)$$

De esta fórmula se puede **deducir** la fórmula de la **ENERGÍA DE SATELIZACIÓN** (energía necesaria para poner un satélite en órbita):

$$E_{\text{satelización}} = GMm \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{2 \cdot r_B} \right) \quad (16)$$

### Conceptos Clave: Gravitación.

- **Distancia  $r$ :** En todas las fórmulas,  $r$  es la distancia al **centro** del planeta. Si te dan la altura  $h$ , recuerda:  $r = R_T + h$ .
- **Signos:** La Energía Potencial ( $E_p$ ) y el Potencial ( $V$ ) son siempre **negativos** (el 0 está en el infinito).

## 1.9. RESUMEN DE FÓRMULAS

Magnitud / Concepto	Fórmula	Unidades (SI)
LEY DE GRAVITACIÓN UNIVERSAL	$\vec{F} = -G \frac{Mm}{r^2} \vec{u}_r$	N
INTENSIDAD DEL CAMPO GRAVITATORIO	$\vec{g} = -G \frac{M}{r^2} \vec{u}_r$	$\text{m s}^{-2}$
CTE. GRAV. UNIVERSAL	$G = 6,67 \times 10^{-11}$	$\text{N m}^2 \text{kg}^{-2}$
MOMENTO ANGULAR	$\vec{L} = \vec{r} \times m\vec{v}$	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$
ENERGÍA POTENCIAL GRAVITATORIA	$E_p = -G \frac{Mm}{r} = mV$	J
POTENCIAL GRAVITATORIO	$V = -G \frac{M}{r}$	$\text{J kg}^{-1}$
TRABAJO DEL CAMPO GRAVITATORIO	$W_{A \rightarrow B} = -\Delta E_p = -m\Delta V$	J
VELOCIDAD ORBITAL	$v_{\text{orbital}} = \sqrt{\frac{GM}{r}}$	$\text{m s}^{-1}$
VELOCIDAD DE ESCAPE	$v_{\text{escape}} = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$	$\text{m s}^{-1}$
ENERGÍA MECÁNICA EN ÓRBITA	$E_m = -G \frac{Mm}{2r}$	J
ENERGÍA DE SATELIZACIÓN	$GMm \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{2r_B} \right)$	J
PERIODO ORBITAL	$T = \frac{2\pi r}{v}$	s

Tabla 1: Formulario de Gravedad

## 2. CAMPO ELÉCTRICO

### 2.1. CARGAS PUNTUALES

#### 2.1.1. Ley de Coulomb

La fuerza de **atracción o repulsión** entre 2 cargas puntuales es directamente proporcional al producto de las cargas e **inversamente proporcional** al cuadrado de la distancia que las separa.

$$\vec{F} = k \frac{Qq}{r^2} \vec{u}_r \implies F = k \frac{Qq}{r^2} \quad (17)$$

Donde  $k = 9 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$  en el vacío, que está relacionada con  $\epsilon$  (permitividad eléctrica):

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon}$$

#### 2.1.2. Líneas de Campo Eléctrico

El campo eléctrico es la **perturbación** que genera un cuerpo por tener carga eléctrica.

- I. Si la carga es **positiva**, el campo eléctrico es de **repulsión**.
- II. Si la carga es **negativa**, el campo eléctrico es de **atracción**.

El campo eléctrico, igual que el campo gravitatorio, es un **campo conservativo**.

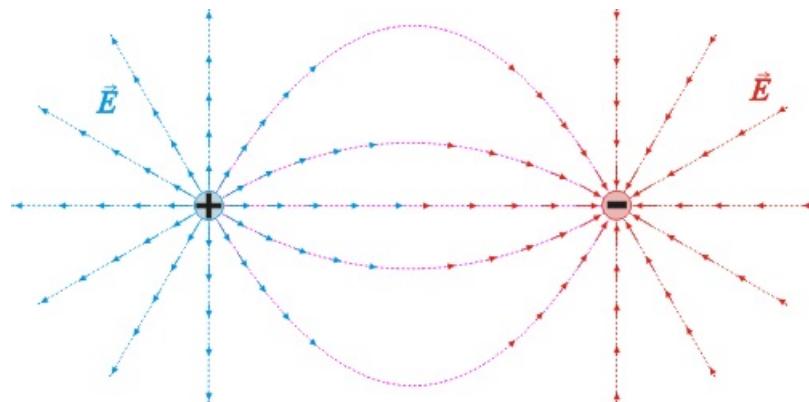


Figura 4: Líneas de Campo Magnético

### 2.1.3. Intensidad del Campo Eléctrico

La **intensidad** de campo eléctrico ( $\vec{E}$ ) (también llamada simplemente campo eléctrico) en un punto se define como la **fuerza** que se ejerce por **unidad de carga** positiva situada en dicho punto:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} \quad (18)$$

$$\vec{E} = k \frac{Q}{r^2} \cdot \vec{u}_r \implies E = k \frac{Q}{r^2} \quad (19)$$

### 2.1.4. Principio de Superposición

$$\vec{F}_T = \sum F_i \quad (20)$$

$$\Delta V = -\vec{E} \cdot \Delta \vec{r} \quad (21)$$

## 2.2. ENERGÍAS Y FUERZAS CONSERVATIVAS

La energía potencial eléctrica ( $E_p$ ) es aquella que **posee** una carga por **encontrarse** bajo la influencia **eléctrica** de otra carga u otras cargas:

$$E_p = k \frac{Qq}{r} \quad (22)$$

### 2.2.1. Potencial Gravitatorio ( $V$ )

Es el trabajo **realizado** por el campo eléctrico para **trasladar** una **unidad** de carga desde un punto hasta el **infinito**.

$$V = \frac{E_p}{q} \implies V = k \frac{Q}{r} \quad (23)$$

### 2.2.2. Trabajo ( $W$ )

La fuerza **eléctrica** (al igual que la fuerza gravitatoria) es una **fuerza central**, ya que está dirigida hacia un punto. El campo eléctrico (igual que el campo gravitatorio) es un **campo conservativo**. El trabajo realizado por el campo **depende** solo de su estado **inicial y final**, no depende de la **trayectoria**.

$$W_{A \rightarrow B} = E_{pA} - E_{pB} \implies W_{A \rightarrow B} = -q(V_B - V_A) \quad (24)$$

## 2.3. CAMPOS ELÉCTRICOS UNIFORMES

### 2.3.1. Líneas de Campo

Las líneas de campo de un campo eléctrico **uniforme** son **líneas de campo paralelas**.

### 2.3.2. Movimiento de Carga en Campo Uniforme

Cuando trabajamos con un campo eléctrico uniforme, al ser **constante**, aplicaremos también la **segunda ley de Newton**,  $\Sigma F = ma$ , siendo esta **aceleración uniforme**.

Por lo tanto, podremos utilizar en este caso las **fórmulas del MRUA**:

$$\left. \begin{aligned} x &= x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \\ v &= v_0 + at \\ v^2 &= v_0^2 + 2a\Delta x \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Podemos resolverlo también mediante el **Principio de Conservación de la Energía Mecánica**, al ser la fuerza eléctrica **conservativa**:

$$\Delta E_m = 0 \implies \Delta E_c = -\Delta E_p \quad (26)$$

### 2.3.3. Campo: Láminas Infinitas

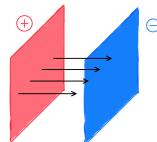


Figura 6: Campo Eléctrico Creado por Láminas Infinitas

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (27)$$

Siendo  $\sigma$  las cargas por superficie  $\frac{\text{cargas (C)}}{\text{superficie (m}^2)}$  y  $\epsilon$  depende del material.

### 2.3.4. Campo: Hilo Infinito

Las líneas de campo salen radialmente del hilo (suponiendo  $\lambda$  positivo).

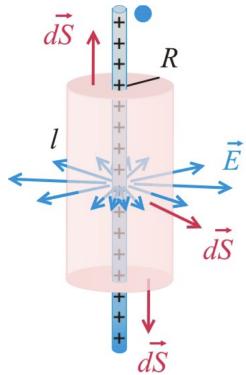


Figura 7: Campo Eléctrico Creado por Un Hilo Infinito

$$E = 2k \frac{\lambda}{r} = \frac{\lambda}{2\epsilon\pi r} \quad (28)$$

Siendo  $\lambda$  las cargas por longitud  $\frac{\text{cargas (C)}}{\text{longitud (m)}}$  y  $\epsilon$  depende del material.

**El Electronvoltio.** Un Electronvoltio se define como la energía que tiene un electrón sometido a una diferencia de potencial de 1 V.

$$1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

#### Consejos Clave: Campo Eléctrico.

- **Vectores vs Escalares:**

- Fuerza ( $\vec{F}$ ) y Campo ( $\vec{E}$ ) son **vectores**
- Potencial ( $V$ ) y Energía ( $E_p$ ) son **escalares**

- **Signo de la carga:** En las fórmulas escalares ( $V, E_p$ ), **incluye** el signo de la carga. En las vectoriales, usa el signo para determinar el sentido del vector.

## 2.4. RESUMEN DE FÓRMULAS

Magnitud / Concepto	Fórmula	Unidades (SI)
LEY DE COULOMB	$\vec{F} = k \frac{Qq}{r^2} \vec{u}_r$	N
CONSTANTE DE COULOMB	$k = 9 \times 10^9 = \frac{1}{4\pi\epsilon}$	N m <sup>2</sup> C <sup>-2</sup>
INTENSIDAD DEL CAMPO ELÉCTRICO (DEFINICIÓN)	$\vec{F} = q\vec{E}$	N
CAMPO ELÉCTRICO CREADO POR UNA CARGA PUNTUAL	$\vec{E} = k \frac{Q}{r^2} \vec{u}_r$	N C <sup>-1</sup>
PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN	$\vec{F}_T = \sum_i \vec{F}_i$	N
ENERGÍA POTENCIAL ELÉCTRICA	$E_p = k \frac{Qq}{r}$	J
POTENCIAL ELÉCTRICO	$V = \frac{E_p}{q} = k \frac{Q}{r}$	V = J C <sup>-1</sup>
TRABAJO DEL CAMPO ELÉCTRICO	$W_{A \rightarrow B} = E_{pA} - E_{pB} = -q(V_B - V_A)$	J
CAMPO ELÉCTRICO UNIFORME	$E = \frac{F}{q}$	N C <sup>-1</sup>
CAMPO CREADO POR LÁMINAS INFINITAS	$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$	N C <sup>-1</sup>
CAMPO CREADO POR UN HILO INFINITO	$E = 2k \frac{\lambda}{r} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon r}$	N C <sup>-1</sup>
RELACIÓN ENTRE V Y E	$\Delta V = -\vec{E} \cdot \Delta \vec{r}$	—
ELECTRON-VOLTIO	$1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19}$	J

Tabla 2: Formulario del Campo Eléctrico

### 3. CAMPO MAGNÉTICO

El campo **magnético** es la **perturbación** que genera un **imán** o **cargas** en **movimiento** (corrientes eléctricas). El campo **magnético**, a diferencia de los campos gravitatorios y eléctricos, es un campo **no conservativo**, ya que el trabajo **sí** depende de la **trayectoria**.

La **intensidad** de campo magnético  $B$  es una magnitud **vectorial**, cuya unidad en el **Sistema Internacional** es el **Tesla** (T). El **tesla** es una unidad muy **grande**. Por ejemplo, el campo magnético terrestre es del orden de  $10^{-5}$  T. Por eso a veces se usa una **unidad menor**, denominada **Gauss** (G):  $1\text{ G} = 10^{-4}\text{ T}$ .

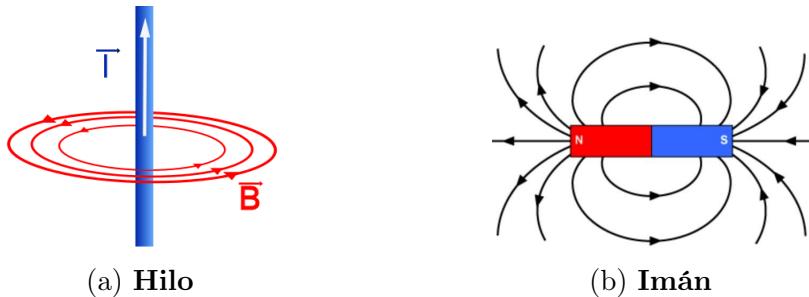


Figura 8: Líneas de Campo Creados por un Hilo y por un Imán

#### 3.1. LEY DE LORENTZ

$$\vec{F}_m = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \implies F_m = |q| \cdot v \cdot B \sin \alpha \quad (29)$$

Siendo  $\alpha$  el **ángulo** que forman  $v$  y  $B$ . La unidad de  $B$  son los **Teslas** (T), que son:  $\text{N C}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ s}$ .

- I. Si  $\vec{v}$  y  $\vec{B}$  son **PARALELOS**:  $\alpha = 0^\circ \implies F_m = 0$ , por lo tanto, la carga describirá un **MRU**.
- II. Si  $\vec{v}$  y  $\vec{B}$  son **PERPENDICULARES**, la **fuerza** será **máxima** y la carga describirá un **MCU**.
- III. En el **resto** de casos, la carga describirá un **movimiento helicoidal** (véase fig. 10).

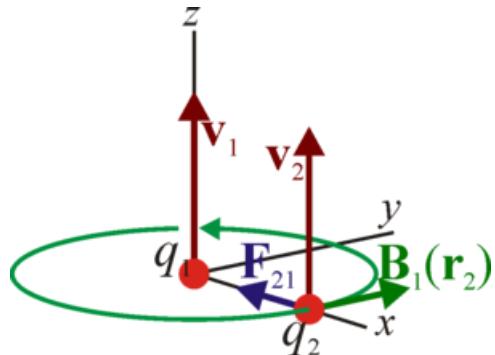


Figura 9: Vectores del Campo Magnético

## 3.2. CARACTERÍSTICAS DEL MOVIMIENTO

La partícula que penetra con **velocidad perpendicular** al campo magnético. El **radio** de la circunferencia  $r$  que describe una partícula cargada **depende** de su **velocidad**. El **periodo** ( $T$ ) del movimiento circular lo podemos **calcular** también. Para las partículas que penetran con un **ángulo**  $\alpha$  **cualquiera** con el campo magnético se pueden **descomponer** en ejes perpendiculares y **paralelos** al campo magnético.

$$r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B} \quad (30)$$

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB} \quad (31)$$

$$\vec{v} = \vec{v}_\perp + \vec{v}_\parallel = v_\perp \cdot \vec{u}_\perp + v_\parallel \cdot \vec{u}_\parallel \quad (32)$$

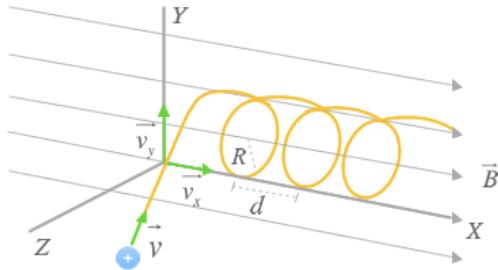


Figura 10: Movimiento Descripto por una Carga con una Velocidad bajo un Ángulo

## 3.3. CÁLCULO DE UN PRODUCTO VECTORIAL

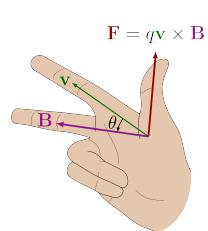
Para obtener el **vector fuerza** magnética  $\vec{F}$  a partir de las **componentes** de la **velocidad**  $\vec{v} = v_x \vec{i} + v_y \vec{j} + v_z \vec{k}$  y del **campo magnético**  $\vec{B} = B_x \vec{i} + B_y \vec{j} + B_z \vec{k}$ , utilizamos la regla del determinante:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) = q \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ v_x & v_y & v_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix} \quad (33)$$

Desarrollando el determinante:

$$\vec{F} = q \left[ (v_y B_z - v_z B_y) \vec{i} - (v_x B_z - v_z B_x) \vec{j} + (v_x B_y - v_y B_x) \vec{k} \right] \quad (34)$$

También se puede usar la regla de la mano derecha o del sacacorchos:



(a) Regla de la Mano Derecha



(b) Regla del Sacacorchos

Figura 11: Reglas de la Mano Derecha y del Sacacorchos

La regla de la **mano derecha** (o del **sacacorchos**) determina **sentidos vectoriales**. Para el sacacorchos, giramos de  $\vec{v}$  a  $\vec{B}$ . Para la mano derecha, véase la figura 11a.

### 3.4. EL SELECTOR DE VELOCIDADES

El selector de velocidades utiliza campos **eléctrico** y **magnético** cruzados. Si las **partículas cargadas** entran con cierta **velocidad**, las fuerzas se **cancelan**. Esto permite que sigan una **trayectoria rectilínea** y **atraviesen** el dispositivo **sin desviarse**.

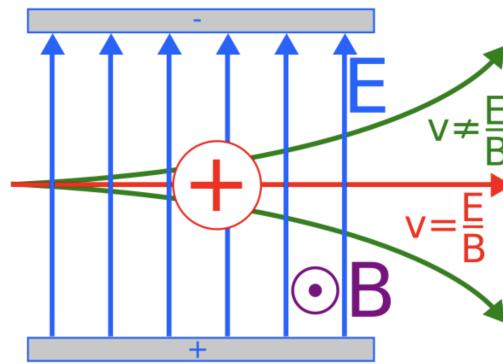


Figura 12: Selector de Velocidades

Para seleccionar las partículas que tienen una **cierta velocidad**, la fuerza eléctrica y magnética han de ser **iguales**:

$$\vec{F}_E = \vec{F}_B \implies E = vB \implies v = \frac{E}{B} \quad (35)$$

### 3.5. ESPECTRÓMETRO DE MASAS

Es un dispositivo que empleado para **separar partículas** cargadas que poseen **distinta relación** ( $\frac{\text{carga}}{\text{masa}}$ ). El espectrómetro de masas consta básicamente de un **selector de velocidades** (que permite seleccionar las partículas con una determinada velocidad) seguido de una **zona** en la que se establece un **campo magnético**. En esta zona, la partícula **cargada** describe una trayectoria **circular**, y una placa **fotográfica** recoge el **impacto** de las partículas después de describir **una semicircunferencia**. De esta forma podemos medir el **radio** de curvatura y calcular la relación  $\frac{\text{carga}}{\text{masa}}$ .

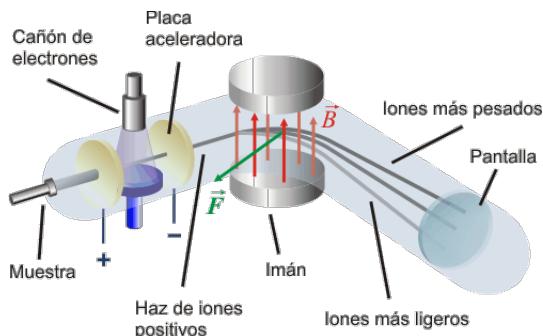


Figura 13: Espectrómetro de Masas

### 3.6. CICLOTRÓN

Un ciclotrón es un **acelerador de partículas** cargadas que después suelen ser utilizadas para producir **reacciones nucleares** o para **obtener información** sobre otros núcleos.

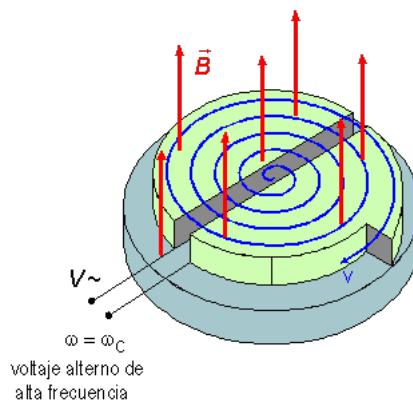


Figura 14: Ciclotrón

- I. Un ciclotrón tiene dos **partes** llamadas "Des" (por su forma). Son recipientes **semicirculares al vacío**, colocados **perpendicularmente** a un **campo  $B$** . Las partículas describen **trayectorias** circulares de radio **creciente**. Las dos "Ds",  $D_1$  y  $D_2$ , están separadas cierta **distancia**.
- II. En ese espacio se **acelera** la partícula mediante una **diferencia de potencial**, **aumentando** su radio, hasta que alcanza un **radio máximo** denominado **radio de extracción**.
- III. El **periodo** es **independiente** de la velocidad de la partícula y de su **radio**, por lo que será **constante** en el **ciclotrón**. Tras una serie de **vueltas**, la partícula **alcanzará** una energía **cinética** máxima con la que saldrá del **ciclotrón**.

$$\left. \begin{aligned} |q| B v = m \frac{v^2}{r} \implies \frac{r}{v} &= \frac{m}{|q| B} \\ T &= \frac{2\pi r}{v} \end{aligned} \right\} T = \frac{2\pi m}{|q| B} \quad (36)$$

La frecuencia en la que hay que cambiar la **polaridad** de la corriente en el ciclotrón, es el periodo de la partícula dividido entre 2. A esta frecuencia se llama **radiofrecuencia**:  $\frac{T}{2} = \frac{\pi m}{|q| B}$ :

$$f_{\text{radiofrecuencia}} = \frac{|q| B}{\pi m} \quad (37)$$

La **energía cinética máxima** que alcanza la partícula depende del radio máximo del ciclotrón ( $R$ ) y del campo magnético ( $B$ ):

$$E_{c \max} = \frac{q^2 B^2 R^2}{2m} \quad (38)$$

#### Consejos Clave: Campo Magnético.

- **Trabajo Nulo:** La fuerza magnética **nunca** realiza trabajo ( $W = 0$ ) porque es siempre perpendicular a la velocidad.
- **Energía Cinética:** Como no hay trabajo, la fuerza magnética **no cambia** la rapidez (módulo de la velocidad), solo curva la trayectoria.  $E_c = \text{cte.}$

### 3.7. RESUMEN DE FÓRMULAS

Magnitud / Concepto	Fórmula	Unidades (SI)
LEY DE LORENTZ (VECTORIAL)	$\vec{F}_m = q(\vec{v} \times \vec{B})$	N
LEY DE LORENTZ (MÓDULO)	$F_m =  q vB \sin \alpha$	N
RADIO DE LA TRAYECTORIA	$r = \frac{mv}{ q B}$	m
PERIODO (PARTÍCULA / CICLOTRÓN)	$T = \frac{2\pi m}{ q B}$	s
FRECUENCIA (CICLOTRÓN)	$f = \frac{ q B}{2\pi m}$	Hz
VELOCIDAD ANGULAR	$\omega = \frac{ q B}{m}$	$\text{rad s}^{-1}$
PASO DE LA HÉLICE	$p = v_{\parallel} \cdot T$	m
SELECTOR DE VELOCIDADES	$v = \frac{E}{B}$	$\text{m s}^{-1}$
ENERGÍA CINÉTICA MÁXIMA (CICLOTRÓN)	$E_{c \max} = \frac{q^2 B^2 R^2}{2m}$	J

Tabla 3: Formulario de Campo Magnético