

**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL DEL TÁCHIRA**



**DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA Y FÍSICA
NÚCLEO DE FÍSICA. LABORATORIO DE FÍSICA II**

PRÁCTICA N° 10

FUERZA SOBRE UNA CARGA ELÉCTRICA EN MOVIMIENTO

**Material elaborado por:
Prof. Efrén Ontiveros C**

San Cristóbal, Abril de 2005

PRÁCTICA N° 10

FUERZA SOBRE UNA CARGA ELÉCTRICA EN MOVIMIENTO

10. A OBJETIVOS

10. A.1 Observar la desviación de un haz de electrones en campos eléctricos de tensión continua y alterna.
10. A.2 Observar la desviación de un haz de electrones bajo la influencia de un campo magnético no homogéneo.
10. A.3 Analizar el comportamiento de una carga eléctrica en movimiento bajo la influencia de un campo magnético homogéneo.
10. A.4 Determinar la relación e/m en función de las variables de las cuales depende.

10. B MÉTODO

Un tubo de desviación con placas planas paralelas incorporadas, es ajustado apropiadamente para observar el comportamiento de un haz de electrones, cuando las placas de desviación son alimentadas con corriente continua y luego con corriente alterna. De esta observación se determinará \vec{v}_0 (velocidad de incidencia del electrón al campo eléctrico), \vec{V} (velocidad con la cual el electrón abandona el campo eléctrico) y α (el ángulo de desviación cuando el electrón sale del campo eléctrico). Sustituyendo el tubo de desviación por un tubo electrónico filiforme, el cual viene montado junto con las bobinas de Helmholtz sobre una placa base, el haz de electrones es sometido inicialmente a la influencia de un campo magnético no homogéneo (producido por el movimiento de un imán) y luego al campo magnético homogéneo producido por las bobinas de Helmholtz, estudiándose así su comportamiento bajo la acción de los campos eléctrico y magnético simultáneamente. Posteriormente se visualizan las trayectorias circulares del haz de electrones, para ciertos valores de corriente en las bobinas y los respectivos valores de voltaje anódico o acelerador, determinándose luego la relación e/m . Finalmente, haremos que el haz de electrones se mueva en el campo magnético uniforme con una velocidad, la cual forma un ángulo arbitrario con la inducción magnética \vec{B} , para hallar el paso y el ángulo de la hélice.

10. C FUNDAMENTO TEÓRICO

10. C.1 RELACIÓN ENERGÉTICA EN UN CAMPO ELÉCTRICO \vec{E} . Consideremos un electrón que se mueve en un campo eléctrico, por ejemplo el producido en un cañón electrónico dispuesto por lo general dentro de un tubo al vacío, tal como se indica en la figura 10.1.

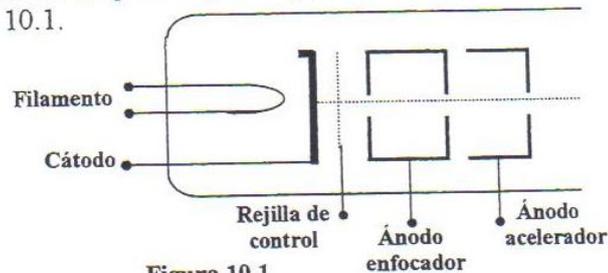


Figura 10.1
Cañón electrónico.

Al filamento se le aplica una tensión que por lo general es de 6.3 V A.C, el cual se pone incandescente calentando al cátodo, produciendo la emisión termoiónica.

Si se aplica una tensión V_A entre el cátodo (-) y el ánodo (+) el electrón será acelerado por el campo eléctrico \vec{E} hacia el ánodo. El electrón al ser emitido por el cátodo recibe la acción de la fuerza eléctrica \vec{F} del campo eléctrico \vec{E}_A originado por la tensión aceleradora V_A , es decir:

$$\vec{F} = e^- \vec{E}_A \quad (1)$$

Esta fuerza acelera al electrón hacia el ánodo y al llegar a la rendija tiene una velocidad \vec{v}_0 y por lo tanto una energía cinética igual a:

$$E_k = \frac{1}{2} m v_0^2 \quad (2)$$

Esta energía es adquirida en su pasaje por el campo eléctrico, y así éste habrá realizado un trabajo igual a:

$$W = e^- V_A \quad (3)$$

En virtud del principio de la conservación de la energía, igualamos las ecuaciones (2) y (3) y así:

$$v_0 = \sqrt{\frac{2e^- V_A}{m}} \quad (4)$$

10. C.2 MOVIMIENTO DE UNA CARGA ELÉCTRICA EN UN CAMPO ELÉCTRICO UNIFORME \vec{E} . La ecuación de movimiento está dada por $ma = q E_p$ ó $a = E_p/m$, donde a es la aceleración que adquiere la partícula, q/m es la carga específica y E_p es la intensidad de campo eléctrico.

Un caso interesante es el de una carga positiva moviéndose a través de un campo eléctrico uniforme que ocupa una región limitada del espacio, como se indica en la figura 10.2. Disparemos la partícula perpendicular a la dirección del campo eléctrico, con velocidad \vec{v}_0 .

La trayectoria AB descrita por la partícula al moverse a través del campo es una parábola. Después de cruzar el campo la partícula readquiere el movimiento rectilíneo, pero con una velocidad \vec{V} diferente en módulo y dirección. Así pues, decimos que el campo eléctrico ha producido una desviación medida por el ángulo α .

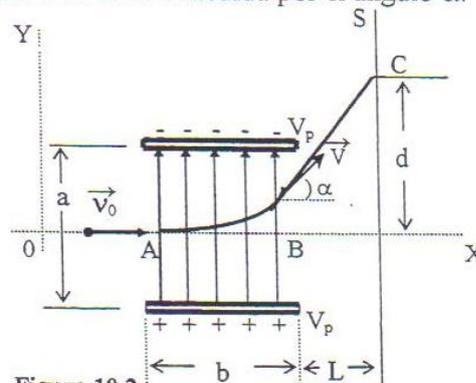


Figura 10.2

Desviación de una carga positiva por un campo eléctrico uniforme.

Las coordenadas de la partícula mientras se mueve a través del campo con una aceleración $(q/m) E_p$, están dadas por:

$$X = v_0 t \quad \text{y} \quad Y = \frac{1}{2} a t^2 = \frac{q E_p t^2}{2m} \quad (5)$$

Eliminando el tiempo, obtenemos la ecuación de la trayectoria:

$$Y = \left(\frac{q E_p}{2m v_0^2} \right) X^2 \quad (6)$$

la cual es una parábola.

El ángulo de desviación α se obtiene determinando la pendiente dy/dx de la trayectoria para $x = b$:

$$\text{Tan } \alpha = \left(\frac{dy}{dx} \right)_{x=b} = \frac{q E_p b}{m v_0^2} \quad (7)$$

Si se coloca una pantalla S a la distancia L , la partícula llegará a ella en el punto C . Por otro lado, se observa que $\text{tan } \alpha \cong d/L$, luego:

$$\frac{q E_p b}{m v_0^2} = \frac{d}{L} \quad (8)$$

Midiendo d , L , b y E obtenemos la velocidad \vec{v}_0 si conocemos la razón q/m ; ó, al contrario podemos obtener q/m si conocemos \vec{v}_0 .

La velocidad \vec{V} una vez que la partícula sale del campo \vec{E}_p es:

$$\vec{V} = \vec{V}_x + \vec{V}_y \quad (9) \text{ donde:}$$

$$V_x = v_0 \quad \text{y} \quad V_y = a t = (q/m) E_p t = [q E_p X / m v_0]_{x=b} \quad (9.1)$$

y así:

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = \sqrt{v_0^2 + (q E_p b / m v_0)^2} \quad (10)$$

Esta velocidad puede también darse en función de las tensiones aceleradora V_A y deflectora V_p . El campo entre las placas está dado por:

$$E_p = \frac{V_p}{a} \quad (11)$$

Luego introduciendo las ecuaciones (4) y (11) en la ecuación (10) tenemos que:

$$V = \sqrt{\left(\frac{2qV_A}{m} \right)^2 + \left(\frac{qV_p b}{m a v_0} \right)^2} \quad \text{ó} \quad V = \sqrt{\left(\frac{2qV_A}{m} \right)^2 + \frac{q}{2mV_A} \left(\frac{V_p b}{a} \right)^2} \quad (12)$$

De igual forma la ecuación de la trayectoria dada por (6) puede expresarse en función de V_A y V_p . Introduciendo las ecuaciones (4) y (11) en la ecuación (6) tenemos:

$$Y = \left(\frac{V_p}{4aV_A} \right) X^2 \quad (13)$$

donde el coeficiente del término cuadrático tiene una dependencia directa con la tensión deflectora V_p e inversa con la tensión aceleradora V_A .

10. C.3 TRABAJO REALIZADO POR UN CAMPO MAGNÉTICO UNIFORME \vec{B} .

El trabajo realizado sobre una carga q es:

$$W_B = \int \vec{F}_B \cdot d\vec{l} = \int F_B dl \cos 90^\circ = 0 \quad (14)$$

Puesto que la fuerza magnética es siempre perpendicular a la velocidad \vec{V} de la carga y por consiguiente a $d\vec{l}$, y así el producto escalar se anula. De aquí se concluye que este tipo de campo no puede cambiar la energía cinética de la partícula, solo puede cambiar la dirección de su velocidad.

10. C.4 FUERZA MAGNÉTICA SOBRE UNA CARGA ELÉCTRICA. Si en lugar de un campo eléctrico, una carga eléctrica q se somete a un campo magnético uniforme de inducción magnética \vec{B} y lanzada dentro del mismo con una velocidad \vec{V} , dicha carga experimentará una fuerza:

$$\vec{F} = q (\vec{V} \times \vec{B}) \quad (15)$$

cuya magnitud es:

$$F = q V B \sin\theta \quad (16)$$

siendo θ el ángulo entre la velocidad \vec{V} y la inducción magnética \vec{B} .

Si el electrón se mueve perpendicularmente a un campo magnético uniforme, y puesto que la fuerza es siempre perpendicular a la velocidad, su efecto es cambiar la dirección de esta última pero no su módulo, resultando un movimiento circular uniforme, como se muestra en la figura 10.3.

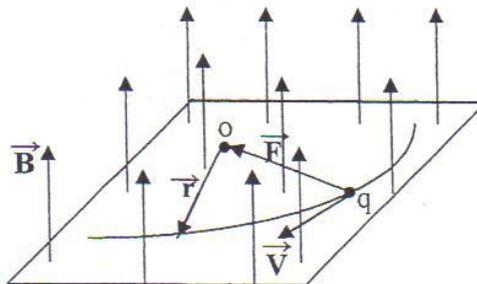


Figura 10.3
Trayectoria circular de una carga que se mueve perpendicularmente a un campo magnético uniforme

La aceleración es por tanto centrípeta, entonces se tiene que la fuerza centrípeta $F_c = mV^2/r$ es igual a la fuerza magnética $F_m = qVB$, es decir:

$$\frac{mV^2}{r} = qVB. \text{ De donde:} \quad (17)$$
$$r = \frac{mV}{qB}$$

la cual da el radio de la circunferencia descrita por la carga.

Al escribir $V = \omega r$ en la ecuación (17), donde $\vec{\omega}$ es la velocidad angular de la partícula, tenemos que:

$$\vec{\omega} = \left(\frac{q}{m}\right)\vec{B} \quad (18)$$

Así pues, la velocidad angular $\vec{\omega}$ es independiente de la velocidad lineal \vec{V} y sólo depende del cociente q/m y del campo \vec{B} . Por otro lado, esta expresión da el módulo de $\vec{\omega}$ pero no su sentido. Recordando que la aceleración en el movimiento circular uniforme se puede escribir en forma vectorial como $\vec{a} = \vec{\omega} \times \vec{v}$ y, por tanto, la ecuación del movimiento $\vec{F} = m\vec{a}$ resulta ser $m\vec{\omega} \times \vec{v} = q\vec{V} \times \vec{B}$. Invertiendo el producto vectorial del lado derecho y dividiendo entre m , tenemos $\vec{\omega} \times \vec{v} = -(q/m)\vec{B} \times \vec{V}$, lo que indica que:

$$\vec{\omega} = -\frac{q}{m}\vec{B} \quad (19)$$

El signo menos indica que ω tiene sentido opuesto de \vec{B} , para una carga positiva y el mismo sentido para una carga negativa, tal cual se indica en la figura 10.4.

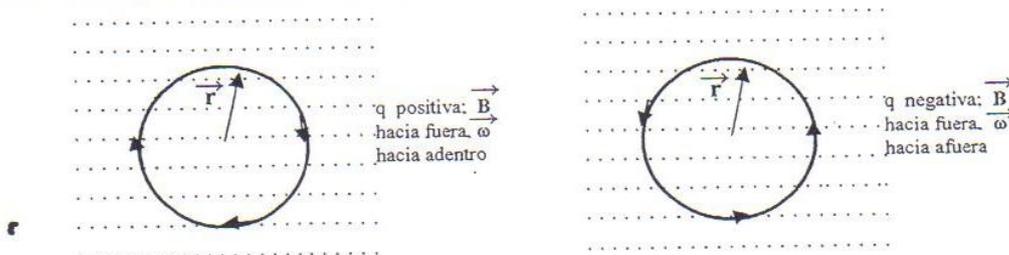


Figura 10.4
Trayectorias circulares para cargas positivas y negativas en un campo magnético uniforme.

Si el electrón se mueve inicialmente en una dirección que no es perpendicular al campo magnético, podemos descomponer la velocidad en sus componentes paralela y perpendicular al campo magnético. La componente paralela permanece constante al campo y la perpendicular cambia continuamente de dirección pero no de magnitud. El movimiento es entonces la resultante de un movimiento uniforme en la dirección del campo con velocidad angular dada por la ecuación:

$$\vec{\omega} = \frac{q}{m}\vec{B}$$

y la trayectoria es una hélice, según se muestra en a figura 10.5.

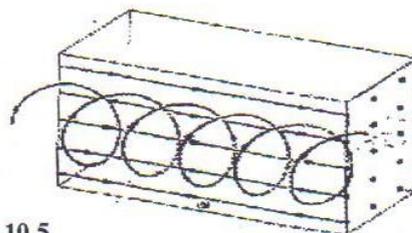


Figura 10.5
Trayectoria helicoidal de un ión positivo que se mueve de manera oblicua a un campo magnético uniforme.

Definiremos *el paso de la hélice* como la distancia que ella avanza cuando la partícula ha girado 360°. Puesto que el campo es uniforme, la partícula no experimenta cambios de energía y el movimiento es uniforme en la dirección del campo. El paso P será:

$$P_{\parallel} = V_{\parallel}T \quad (20)$$

donde V_{\parallel} es la velocidad paralela al campo.

$$V_{\parallel} = |V| \cos\theta = \sqrt{\frac{2qV_A}{m}} \cos\theta \quad (21)$$

El período T en función de ω viene expresado como:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (22)$$

y ω se halla aplicando la ecuación (18).

10. C.5 RELACIÓN CARGA MASA (q/m). La relación carga masa del electrón (q/m) se determinará por el voltaje en el ánodo y el radio de curvatura de un haz de electrones en una trayectoria circular, por medio de un campo magnético de densidad conocida \vec{B} . Si la trayectoria del haz de electrones es inicialmente normal a la dirección del campo, luego los electrones seguirán una trayectoria circular, entonces se tiene que la fuerza centrípeta es igual a la fuerza magnética, es decir:

$$\frac{mV^2}{r} = qVB \quad (23)$$

Por otro lado, el trabajo efectuado sobre los electrones es:

$$qV_A = \frac{1}{2} m V^2 \quad (24)$$

y así de (23) y (24) tenemos finalmente que:

$$\frac{q}{m} = \frac{2V_A}{B^2 r^2} \quad (25)$$

donde V_A es el voltaje anódico o acelerador, B es la magnitud de la inducción magnética y r es el radio de curvatura.

10. D EQUIPO Y MATERIAL NECESARIO

Tubo de desviación con placas paralelas incorporadas. Tubo de rayo filiforme con bobinas de Helmholtz. Fuente de alimentación regulada. Fuente de alimentación universal. Dos fuentes de alta tensión (0 – 3000V). Dos multímetros digitales. Imán permanente. Interruptor monopolar. Cables para conexiones.

10. E. PROCEDIMIENTO

10. E.1 EXPERIMENTAL

10. E.1.1 Monte el tubo de desviación y aliméntelo como se indica en la figura 10.6, manteniendo las fuentes apagadas.

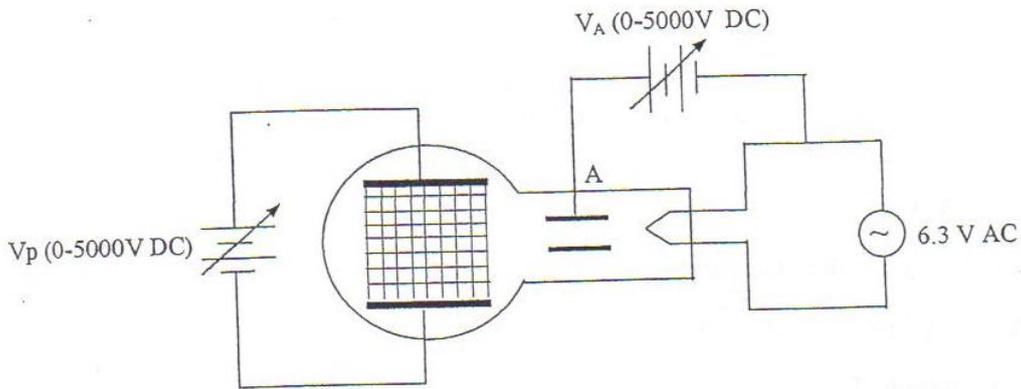


Figura 10.6
Tubo de desviación.

10. E.1.1.1 Encienda la fuente de 6.3V AC y espere dos (02) minutos hasta que el tubo adquiera su temperatura de trabajo.

10. E.1.1.2 Incremente el voltaje de ánodo V_A hasta que se haga visible el haz de electrones ¿Qué trayectoria describe el haz?

10. E.1.1.3 Encienda la fuente que alimenta las placas desviadoras e incremente el voltaje V_p hasta que el haz de electrones adquiera una desviación apreciable. ¿Qué trayectoria describe el haz? ¿Puedes reconocer la placa positiva?

10. E.1.1.4 Realice las mediciones que se indican en la tabla I.

TABLA I

V_p (V)	V_A (V)	a (m)	b (m)

Donde V_p es el voltaje entre las placas desviadoras, V_A es el voltaje de ánodo, a es la separación entre las placas y b es la longitud de las placas.

10. E.1.1.5 Desconecte la fuente V_p y en su lugar conecte una fuente de tensión alterna V_f , enciéndela e incremente V_A hasta que observe claramente el haz de electrones. Incremente V_f hasta que el haz se desvíe. ¿Cómo es la desviación?

10. E.1.2 Revise el montaje dado en la figura 10.7. Por favor, deje todas las conexiones como las encontró. Si tiene diferencias respecto a la revisión, notifíquelas al profesor.

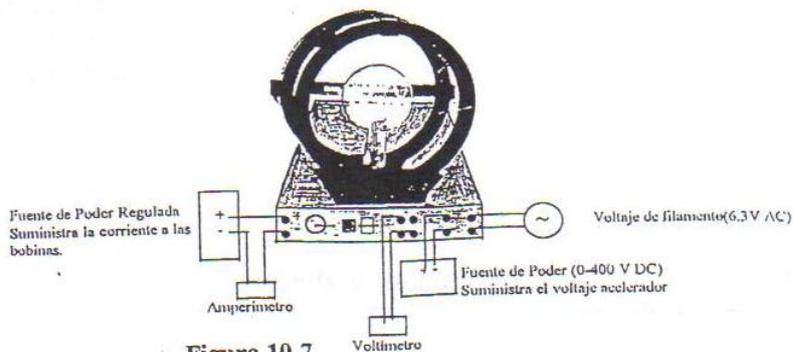


Figura 10.7
Montaje para determinar la relación e/m.

10. E.1.2.1 Encienda la fuente universal e inmediatamente quedará energizado el filamento. Espere dos (02) minutos hasta que él adquiera su temperatura de funcionamiento. Incremente el voltaje acelerador (*que no exceda los 300 V*) hasta que aparezca el haz de electrones. Mueva la perilla del foco hasta que el haz quede lo mejor definido posible. Observe que el haz viaja en línea recta.

10. E.1.2.2 Estando el haz presente en el tubo, alimente las bobinas de Helmholtz con una corriente entre 1.5 A a 2.0 A. El haz experimenta una desviación.

10. E.1.2.3 Gire suavemente el tubo. ¿Qué trayectoria describe el haz? ¿Qué podría decirse con relación al ángulo formado entre la velocidad de los electrones y el campo \mathbf{B} ? ¿Quedaría de esta forma determinada la dirección del campo?

10. E.1.2.4 Gire nuevamente el tubo de manera que la velocidad del haz sea perpendicular al campo ¿Qué trayectoria describe el haz?

10. E.1.2.5 Con la velocidad del haz perpendicular al campo $\vec{\mathbf{B}}$, establezca un valor de corriente entre 1.5A a 2.0A, el cual medirá en el amperímetro y seleccione cinco (05) valores de voltajes aceleradores. Halle para el valor de I con cada uno de los valores de V_A , las trayectorias circulares del haz de electrones. Con el catetómetro (telescopio de bajo alcance), determine el radio r de cada una de las cinco trayectorias. Complete la tabla II.

TABLA II

I (A)	V_A (V)	r (m)

10. E.1.2.6 Seleccione ahora cinco (05) valores de corriente y un valor fijo de voltaje acelerador V_A . Complete la tabla III.

TABLA III

V_A (V)	I (A)	r (m)

10. E.2 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

10. E.2.1 Con las mediciones realizadas en la tabla I determine: \vec{v}_0 , E_p , \vec{V} (velocidad con la cual sale el electrón de las placas) y el ángulo de desviación α , empleando las ecuaciones (4), (11), (10) y (7) respectivamente.

10. E.2.1.1 ¿Cómo es la velocidad de salida \vec{V} en relación a la velocidad de entrada \vec{v}_0 , en cuanto a módulo y dirección?

10. E.2.2 Compare la desviación del haz de electrones cuando es sometido en un campo eléctrico de tensión continua y uno de tensión alterna.

10. E.2.3 Razones las interrogantes dadas en las parte 10.E.1.2.3 y 10.E.1.2.4.

10. E.2.4 Sobre la base de los datos obtenidos en las tablas II y III determine la relación e/m promedio.

Recuerde que $B = 7.80 \times 10^{-4} \text{ T (Wb/m}^2\text{)}$ y $e/m = 1.7588 \times 10^{11} \text{ C/Kg}$.

10. F CUESTIONARIO

10. F.1 Una partícula con carga positiva entra en una región donde hay un campo eléctrico uniforme. Describa el movimiento de la partícula si la velocidad inicial está: a) en la dirección del campo, b) directamente opuesta al campo y c) formando un ángulo respecto al campo.

10. F.2 En la figura 10.8 se lanza un electrón a lo largo del eje equidistante de las láminas de un tubo de rayos catódicos, con velocidad inicial de $2 \times 10^7 \text{ m/s}$. El campo eléctrico uniforme entre las placas tiene una intensidad de 20.000 N/C y está dirigido hacia arriba. a) ¿Cuánto se ha separado el electrón del eje cuando alcanza el borde de las láminas?, b) ¿qué ángulo forma su velocidad con el eje al abandonar las láminas?, c) ¿en qué punto por debajo del eje incidirá sobre la pantalla fluorescente S?

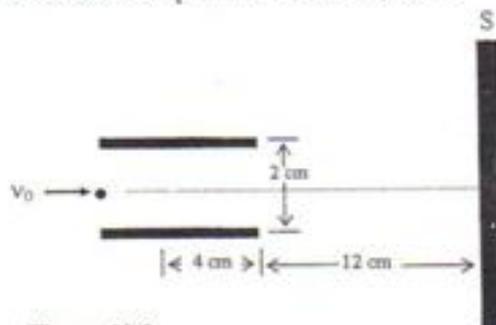


Figura 10.8

10. F.3 Un imán potente se coloca debajo de un anillo conductor horizontal de radio r que lleva una corriente I , tal como se muestra en la figura 10.9. Si las líneas de campo magnético hacen un ángulo θ con la vertical en donde se encuentre el anillo, ¿Cuál es la magnitud y la dirección de la fuerza sobre el anillo?

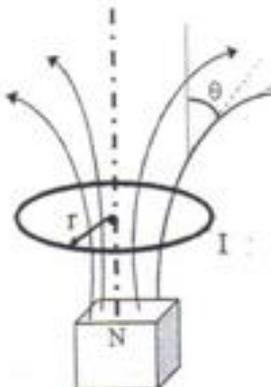


Figura 10.9