



Universidad
Rey Juan Carlos

Prácticas de laboratorio de Fundamentos de
Electricidad y Magnetismo

Curso 2018/2019

Departamento de Biología y Geología, Física, Química
Inorgánica y Analítica

Índice general

1. Transformador	1
1.1. Conceptos aplicados	1
1.2. Fundamento teórico	1
1.3. Montaje experimental y Resultados	2
1.3.1. Relación de transformación	2
1.3.2. Voltaje en función del número de espiras	4
1.4. Discusión	5
1.5. Cuestiones	5
2. Determinación del campo magnético terrestre	6
2.1. Objetivo	6
2.2. Fundamento teórico	6
2.2.1. Componente horizontal	6
2.3. Componente vertical	7
2.4. Resultados	8
2.4.1. Cálculo de la constante K de la bobina	8
2.4.2. Determinación de la componente horizontal del campo magnético terrestre.	8
2.4.3. Determinación de la componente vertical del campo magnético terrestre	9
2.4.4. Determinar el campo magnético terrestre local	9
2.5. Discusión	9
2.6. Cuestiones	9
3. Inductancia de solenoides	10
3.1. Conceptos aplicados	10
3.2. Fundamento teórico	10
3.3. Montaje experimental y Resultados	11
3.3.1. Inductancia en función de N	11
3.3.2. Inductancia en función de l	12
3.3.3. Inductancia en función de r	12
3.4. Discusión	12
3.5. Cuestiones	13
4. Dinámica de condensadores	14
4.1. Objetivo	14
4.2. Fundamento teórico	14

4.2.1. Dinámica del condensador	14
4.3. Montaje experimental y Resultados	15
4.3.1. Medida de la constante de tiempo τ de un circuito RC.	15
4.4. Discusión	18
4.5. Cuestiones	18
5. Momento de espiras en campos magnéticos	19
5.1. Objetivos	19
5.2. Fundamento teórico	19
5.3. Montaje experimental y Resultados	20
5.3.1. Momento magnético en función del ángulo	20
5.3.2. Momento magnético en función de la intensidad de corriente	21
5.3.3. Momento magnético en función de las características de las espira	22
5.4. Discusión	23
5.5. Cuestiones	23
6. Capacidad de esferas metálicas	24
6.1. Conceptos aplicados	24
6.2. Fundamento teórico	24
6.3. Montaje experimental y Resultados	25
6.3.1. Determinación de la capacidad de esferas metálicas	25
6.3.2. Determinación de la capacidad de condensadores esféricos	26
6.4. Discusión	28
6.5. Cuestiones	28
7. Inducción electromagnética	29
7.1. Objetivo	29
7.2. Fundamento teórico	29
7.3. Montaje experimental	30
7.4. Resultados	31
7.4.1. Voltaje en función de la corriente	31
7.4.2. Voltaje en función de frecuencia	32
7.4.3. Voltaje en función de número de vueltas	32
7.4.4. Voltaje en función de la sección	32
7.5. Discusión	33
7.6. Cuestiones	33
8. Pérdida por histerisis de un núcleo ferromagnético	34
8.1. Fundamento teórico	34
8.2. Dispositivo experimental	35
8.2.1. Medidas geométricas	36
8.2.2. Medidas de campos magnéticos	36
8.3. Resultados	37
8.4. Preguntas	37

9. Efecto Hall en metales	38
9.1. Fundamento teórico.	38
9.2. Dispositivo experimental	39
9.3. Medidas	39
9.4. Discusión	40
9.5. Cuestiones	40

Capítulo 1

Transformador

1.1. Conceptos aplicados

En esta práctica se estudiará la relación entre los voltajes y corrientes de salida del transformador, en función del voltaje y corriente de entrada y del número de espiras de ambas bobinas.

1.2. Fundamento teórico

Cuando una bobina de corriente se somete a una diferencia de potencial variable V_1 , se genera en ella un flujo magnético Φ dado por

$$V_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1.1)$$

donde N_1 es el número de espiras de la bobina (primaria). El signo menos indica que la variación del flujo magnético es tal que se opone a la variación de V_1 .

Si a través de un núcleo ferromagnético este flujo magnético variable Φ es conducido hasta atravesar una segunda bobina de N_2 espiras (secundaria), inducirá en ella una diferencia de potencial V_2 tal que

$$V_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Por tanto la relación entre ambas diferencias de potencial es, en amplitud,

$$V_2 = \frac{N_2}{N_1} V_1, \quad (1.2)$$

expresión conocida como ecuación del transformador. El cociente N_2/N_1 es el cociente de vueltas del transformador. Si $N_2 > N_1$ el voltaje secundario es mayor que el primario y se dice que el transformador es *elevador o de alta*, y *reductor o de baja* en caso contrario. Si se considera que no hay pérdidas de flujo magnético ni energía, la relación entre las corrientes que atraviesan ambas bobinas es

$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1. \quad (1.3)$$



Figura 1.1: Montaje experimental.

Nótese que la relación entre corrientes es inversa a la que hay entre tensiones.

Esto sucede en el transformador ideal. Sin embargo, en general hay pérdidas de flujo magnético y las relaciones 1.2 y 1.3 no son exactas, sino que se pueden expresar como

$$V_2 = f \frac{N_2}{N_1} V_1. \quad (1.4)$$

$$I_2 = \frac{1}{f} \frac{N_1}{N_2} I_1. \quad (1.5)$$

La cantidad $100f$ es el porcentaje de voltaje inducido en la bobina secundaria respecto del caso ideal, a lo que denominaremos *coeficiente de acoplamiento*.

1.3. Montaje experimental y Resultados

El sistema experimental se observa en la figura 1.1, esquematizado en la figura 1.2. Los amperímetros con los que se mide la corriente del circuito primario y secundario se deben conectar en serie con las bobinas (como en la figura 1.2). Los voltajes se miden a través de un mismo voltímetro, que mediante un interruptor permite elegir tomar el voltaje primario o el secundario, respectivamente.

Tomando un voltaje constante en la fuente, la corriente primaria se ajusta usando el reostato del circuito primario. El núcleo de hierro se debe abrir sólo cuando la fuente de alterna está apagada, para evitar el paso de excesiva corriente. Cuando se use el reostato, la corriente no debe exceder de 6,2 A durante 8 minutos.

1.3.1. Relación de transformación

Disponer las bobinas en la posición $N_1=84$ y $N_2=84$. Variando la carga del reostato, tomar medidas para el voltaje primario V_1 de 1 a 10 V, en pasos de 0,5 V, anotando

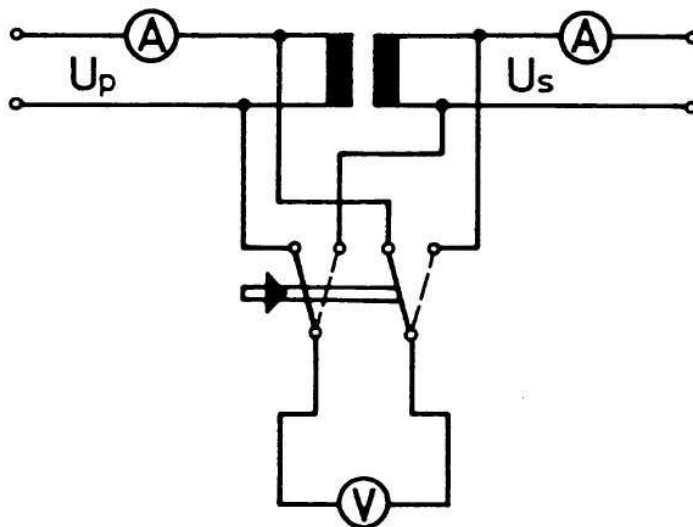


Figura 1.2: Esquema de la conexión de los polímetros al transformador.

simultáneamente para cada posición los valores del voltaje secundario.

V_1 (V)	V_2 (V)

- Representar gráficamente los valores de V_2 frente V_1 .
- Calcular la pendiente a , la ordenada en el origen b y el coeficiente de correlación r del ajuste lineal $V_2 = aV_1 + b$.
- Comparando la regresión lineal experimental obtenida con el valor teórico de la relación entre V_2 e V_1 dado por la ecuación 1.4, calcular el rendimiento del transformador.

Se cierra ahora el secundario con el amperímetro para medir la corriente I_2 . Variar la

corriente de entrada I_1 y anotar simultaneamente la corriente de salida I_2 .

I_1 (A)	I_2 (A)

- Representar gráficamente los valores de I_2 en función de I_1 .
- Calcular la pendiente a' , la ordenada en el origen b' y el coeficiente de correlación r' del ajuste lineal $I_2 = a'I_1 + b'$.
- Calcular de nuevo el rendimiento a partir de la ecuación 1.4 y del ajuste lineal anterior. Comparar el rendimiento obtenido con la relación obtenida gracias a las tensiones.

1.3.2. Voltaje en función del número de espiras

Fijar el valor del voltaje primario a $V_1 = 0,2\text{V}$ y de la bobina primaria a $N_1=28$ espiras. Medir el voltaje de salida V_2 para todos los valores posibles del número de espiras de la bobina secundaria N_2 .

N_2	V_2 (V)
14	
28	
42	
70	
84	
112	
140	

- Representar gráficamente los valores de V_2 en función de N_2 .
- Calcular la pendiente a'' , la ordenada en el origen b'' y el coeficiente de correlación r'' del ajuste lineal $V_2 = a''N_2 + b''$.
- Según la relación 1.2, ¿cuál es el valor teórico de a'' ?

1.4. Discusión

- Discutir la linealidad de la ecuación 1.2. ¿Esta relación es válida para cualquier voltaje de entrada?

1.5. Cuestiones

1. ¿Cuál es el papel del circuito magnético?
2. Dada una relación de transformación de un transformador, multiplicamos el número de espiras a la entrada y a la salida por 10. ¿Cuál es la nueva relación de transformación? ¿Cómo evoluciona el rendimiento?

Capítulo 2

Determinación del campo magnético terrestre

2.1. Objetivo

Medida de campos magnéticos. Determinación del campo magnético terrestre.

2.2. Fundamento teórico

La Tierra posee un campo magnético propio, cuyas líneas son semejantes a las de un imán que tuviera el polo sur cerca del polo norte geográfico. Las brújulas se orientan alineando su campo propio con el campo externo terrestre, de manera que una brújula en reposo en el plano horizontal, nos indicará la dirección N-S del campo terrestre.

Cuando se superpone otro campo magnético exterior horizontal, la brújula indicará la dirección del campo resultante en el punto en que está colocada. Para crear este campo externo se utilizan las bobinas de Helmholtz: Son dos bobinas iguales, (con el mismo número de espiras n , igual radio R , con longitud $L \ll R$), separadas por una distancia R . En estas condiciones, al ser recorridas por la misma intensidad I en el mismo sentido, crean en el centro del conjunto un campo magnético aproximadamente constante.

2.2.1. Componente horizontal

Si se coloca el eje de las bobinas perpendicular a la dirección N-S del campo terrestre, una brújula nos indicará el campo neto horizontal:

- ${}^h\mathbf{B}_H$ Componente horizontal del campo de la bobina en su centro.
- ${}^h\mathbf{B}_E$ Componente horizontal del campo magnético terrestre
- ${}^h\mathbf{B}_R$ Componente horizontal del campo resultante.

La magnitud de los campos de la figura 2.1 se relacionan mediante:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{B_H}{{}^hB_E} \quad (2.1)$$

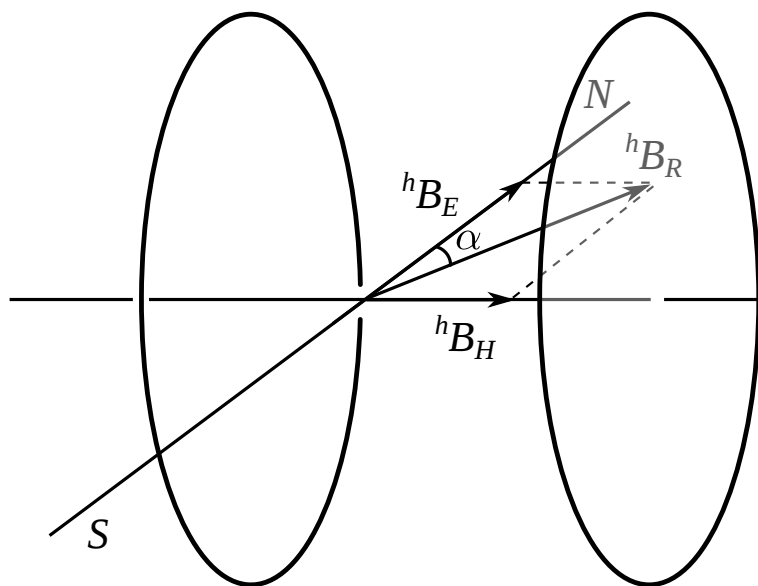


Figura 2.1: Representación del campo terrestre y del campo de la bobina de Helmholtz.

además $\varphi = \pi/2$.

Cuando se mide el ángulo α para diferentes campos de las bobinas, se puede obtener la componente horizontal del campo terrestre mediante un ajuste lineal, ya que

$$B_H = {}^h B_E \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (2.2)$$

Para determinar el campo creado por las bobinas primero deberemos proceder a su calibración experimental. Teóricamente puede obtenerse que el campo creado por las bobinas de Helmholtz en su centro (B_H), es proporcional a la intensidad I que circula por ellas:

$$B_H = KI \quad (2.3)$$

Con lo que, una vez determinada la constante K , la ecuación (2.2) se convierte en

$$KI = {}^h B_E \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (2.4)$$

Así, variando los valores de α y leyendo las intensidades para las que se producen, se puede obtener la componente horizontal del campo magnético terrestre.

2.3. Componente vertical

Si se coloca una brújula de manera que pueda moverse libremente en un plano vertical perpendicular a la dirección N-S, en su posición de equilibrio quedará alineada con la línea de campo magnético terrestre que pase por ella.

- \mathbf{B}_E Campo magnético terrestre.
- ${}^v \mathbf{B}_E$ Componente vertical del campo magnético terrestre.
- ${}^h \mathbf{B}_E$ Componente horizontal del campo magnético terrestre.

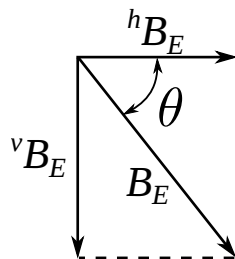


Figura 2.2: Componente vertical del campo magnético terrestre.

De la Fig. 2, una vez conocida la componente horizontal y medido θ , se puede obtener la vertical:

$${}^vB_E = {}^hB_E \cdot \operatorname{tg}\theta \quad (2.5)$$

A partir de estas dos componentes, se puede obtener el campo terrestre.

2.4. Resultados

PRECAUCIONES

Es muy importante manipular la brújula con delicadeza y no sujetarla para que se detenga. En caso contrario se sale del eje de rotación y se rompe. Antes de conectar la fuente preguntad al profesor.

2.4.1. Cálculo de la constante K de la bobina

En primer lugar hay que determinar la dirección N-S del campo terrestre horizontal mediante la brújula. Para ello, una vez ésta en reposo, se gira cuidadosamente la base de su soporte, hasta que quede alineada con el ángulo cero de la escala graduada. Se colocan ahora las bobinas de Helmholtz de manera que su eje sea perpendicular a la dirección N-S marcada por el soporte horizontal de la brújula. Se retira la brújula y se coloca la sonda Hall en la dirección del eje z , de manera que su sensor quede lo más centrado posible en el interior de las bobinas.

Se conectan entre sí los dos terminales marcados con el n°1 en la base de las bobinas. (conexión en serie). Una vez comprobado el circuito, se enciende el teslámetro de la sonda Hall y se selecciona las unidades en mT. Se conecta la fuente de alimentación a la red. Se comienza por 0.25A y se espera a que la lectura del teslámetro se estabilice. Se construye una tabla (I, B_H) a intervalos de 0.25A hasta 2A. Se ajusta por regresión lineal y se obtiene K . **(Desconectar la fuente de alimentación antes de continuar).**

2.4.2. Determinación de la componente horizontal del campo magnético terrestre.

Se retira la sonda Hall del centro de las bobinas y se vuelve a colocar la brújula en la posición inicial del apartado anterior.

Una vez estabilizada la aguja en el ángulo cero, se enciende de nuevo la fuente de alimentación tomando una intensidad inicial de 0.50A, dejando que la brújula se estabilice alrededor de los 90° de desviación.

A partir de esa posición, se baja muy lentamente la intensidad hasta que la desviación sea de 80°. Se anota la I correspondiente. Se sigue bajando la desviación de 10° en 10° y anotando las intensidades. (**Desconectar la fuente de alimentación**). Se construye una tabla con los valores correspondientes a la ecuación (2.4) y se ajusta por regresión lineal para obtener hB_E .

2.4.3. Determinación de la componente vertical del campo magnético terrestre

Desde la posición horizontal N-S se hace girar la escala graduada para hacer que la brújula oscile en el plano vertical. Se espera a que se quede en reposo, y se mide el ángulo de desviación. Usando la ecuación (2.5), se determina vB_E .

2.4.4. Determinar el campo magnético terrestre local

Usando los valores anteriores de las componentes vB_E y hB_E , obtener B_E . Expresar los resultados con sus intervalos de error correspondientes.

2.5. Discusión

- Discutir cualquier otro resultado o problema de interés encontrado en el experimento.

2.6. Cuestiones

1. Buscar los valores esperados en Madrid para las dos componentes del campo magnético terrestre, así como del campo B_E .
2. Comparar valores encontrados en la bibliografía, con los resultados obtenidos y discutir la validez de los mismos.

Capítulo 3

Inductancia de solenoides

3.1. Conceptos aplicados

Se aplica un voltaje alterno en onda cuadrada a un circuito oscilatorio en el que hay bobinas y condensadores. Dado que la capacidad del condensador es conocida, la medida de la frecuencia natural de oscilación proporciona el valor de la inductancia de la bobina.

3.2. Fundamento teórico

Cuando una corriente I atraviesa una bobina cilíndrica de longitud l , área de sección $A = \pi r^2$, y número de vueltas N , la bobina genera un campo magnético longitudinal. Si el radio de la bobina es mucho menor que su longitud, y la bobina no tiene núcleo en su interior, el valor del campo magnético es

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I, \quad (3.1)$$

siendo μ_0 el valor de la permeabilidad del aire. El flujo magnético a través de la bobina es, entonces,

$$\Phi = \mu_0 \frac{N}{l} I A. \quad (3.2)$$

Si la corriente I que atraviesa la bobina varía en el tiempo, la ley de Faraday establece que aparece una fem inducida, \mathcal{E}_{ind} , en la bobina, cuyo valor es

$$\mathcal{E}_{ind} = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\mu_0 \frac{\pi r^2 N^2}{l} \frac{dI}{dt} = -L \frac{dI}{dt}, \quad (3.3)$$

donde se ha definido la inductancia (o coeficiente de autoinducción) L de la bobina como

$$L = \mu_0 \frac{\pi r^2 N^2}{l}. \quad (3.4)$$

Esta ecuación es estrictamente cierta sólo para bobinas largas, en las que $r \ll l$. En la práctica, esto no es completamente cierto, de modo que la ecuación (3.4) ha de ser reemplazada. Una fórmula que da muy buenos resultados es

$$L = 2,1 \times 10^{-6} \times N^2 r \left(\frac{r}{l} \right)^{3/4}. \quad (3.5)$$



Figura 3.1: Montaje experimental.

3.3. Montaje experimental y Resultados

El montaje experimental es el de la figura 3.1. Consta de dos circuitos acoplados magnéticamente. El primero de ellos es el circuito inductor, en el que la fuente de tensión aplica una onda alterna cuadrada, de baja frecuencia $f = 500$ Hz y amplitud media, a una bobina de excitación de 1200 vueltas. El cambio en el campo magnético de la bobina de excitación induce una fem en la bobina del circuito inducido, formado por una bobina, de inductancia desconocida L , conectada en paralelo a un condensador de capacidad C conocida, y a un osciloscopio en el que leemos la salida de este circuito.

En el osciloscopio se verá una onda amortiguada de frecuencia angular ω_0 , dada por

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_{tot}}}, \quad (3.6)$$

donde L es la inductancia de la bobina secundaria y $C_{tot} = C + C_i$, siendo C la capacidad del condensador del circuito inducido y $C_i = 20$ pF la capacidad interna del osciloscopio. Se utilizarán bobinas de diferentes longitudes l , diferentes diámetros $2r$ y diferentes números de vueltas N . Los diámetros y longitudes se miden con los calibres y reglas a disposición del experimentador. En el osciloscopio se mide el periodo T de la oscilación amortiguada, a partir del cual se calcula la frecuencia f .

3.3.1. Inductancia en función de N

Medir el periodo T y calcular la frecuencia f y la inductancia L (usar la ecuación 3.6) frente al número de vueltas N de las tres bobinas que tienen mismo diámetro y misma longitud.

N	T (ms)	f (kHz)	L (μ H)
300			
150			
75			

- Representar gráficamente la inductancia L en función del número de vueltas N .

- Hacer un ajuste lineal del logaritmo neperiano de L en función del logaritmo neperiano de N . Comparar el valor de la pendiente y de la ordenada en el origen con los resultados teóricos obtenidos con la ecuación 3.5.

3.3.2. Inductancia en función de l

Medir el periodo T y calcular la frecuencia f y la inductancia por número de vueltas al cuadrado L/N^2 (usar la ecuación 3.6) en función de la longitud l de las tres bobinas que tienen mismo diámetro (40 mm).

l (mm)	T (ms)	f (kHz)	L/N^2 (μH)
160			
105			
53			

- Representar gráficamente la inductancia por vuelta al cuadrado L/N^2 en función de la longitud l .
- Hacer un ajuste lineal del logaritmo neperiano de L/N^2 en función del logaritmo neperiano de l . Comparar el valor de la pendiente y de la ordenada en el origen con los resultados teóricos obtenidos con la ecuación 3.5.

3.3.3. Inductancia en función de r

Medir el periodo T y calcular la frecuencia f y la inductancia L (usar la ecuación 3.6) frente al radio r de las tres bobinas que tienen misma longitud y mismo número de vueltas.

r (mm)	T (ms)	f (kHz)	L (μH)
20			
16			
13			

- Representar gráficamente la inductancia L en función del radio r .
- Hacer un ajuste lineal del logaritmo neperiano de L en función del logaritmo neperiano de r . Explicar qué valores deberían obtenerse para la pendiente y la ordenada en el origen del ajuste (según la ecuación 3.5) y compararlos con los obtenidos.

3.4. Discusión

- Comentar y discutir el valor de la autoinductancia obtenida.
- Comparar los resultados experimentales para cada bobina con los que se obtienen utilizando la fórmula 3.5.
- Discutir cualquier otro resultado o problema de interés encontrado en el experimento.

3.5. Cuestiones

1. ¿Por qué la oscilación resultante es subamortiguada?
2. ¿Cómo tiene que ser campo magnético para que se manifieste el fenómeno de inducción?

Capítulo 4

Dinámica de condensadores

4.1. Objetivo

En esta práctica se estudiará la dinámica de elementos capacitivos midiendo la corriente y la tensión de estos elementos cuando se les excita con una señal de tensión cuadrada.

4.2. Fundamento teórico

4.2.1. Dinámica del condensador

Los condensadores son elementos pasivos capaces de almacenar energía en forma de cargas eléctricas. Estas cargas se acumulan en el condensador a una cierta velocidad que depende de la capacidad del condensador y del circuito de carga. Para poder llevar a cabo un proceso de carga en un condensador en un circuito de corriente continua es necesario disponer en el circuito de una resistencia R . En la figura 4.1 tenemos un generador de forma de onda cuadrada conectado a un elemento RC en serie. Consideramos el condensador inicialmente descargado, es decir $V_c(0) = 0V$. Cuando conectamos la fuente de tensión, la tensión pasa bruscamente de $0V$ a un valor V_0 constante durante un intervalo de tiempo que consideramos largo. En estas condiciones, se puede demostrar que la dinámica del condensador obedece a la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{RC}(V_0 - V_c) \quad (4.1)$$

Durante el proceso de carga la evolución temporal de la intensidad de corriente en el condensador viene dada por la expresión,

$$I(t) = I_0 e^{\frac{-t}{RC}}, \quad (4.2)$$

en la que R es la resistencia del circuito por el que se carga, C es la capacidad del condensador, t es el tiempo e I_0 es la intensidad inicial del condensador cuyo valor es:

$$I_0 = \frac{V_0}{R}, \quad (4.3)$$

Si nos interesa la tensión de la resistencia tenemos la siguiente expresión:

$$V_R(t) = RI(t) = RI_0 e^{\frac{-t}{RC}} = V_0 e^{\frac{-t}{RC}} \quad (4.4)$$

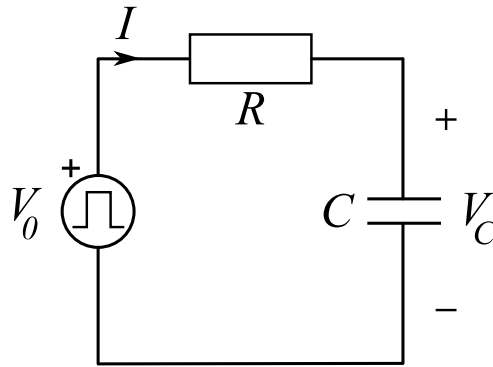


Figura 4.1: Esquema del circuito RC.

La tensión del condensador se halla por las leyes de Kirchhoff:

$$V_C(t) = V_0(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (4.5)$$

A la expresión $\tau = RC$, la cual tiene unidades de tiempo, se le conoce como constante de tiempo del circuito, y es una característica intrínseca del circuito RC, ya que nos da idea de como de rápido se llevarán a cabo los procesos de carga y descarga del mismo. La medida de esta constante τ será el objeto de nuestra práctica.

4.3. Montaje experimental y Resultados

El montaje experimental de nuestra práctica puede verse reflejado en las figuras 4.1 y 4.2. En esta práctica, tal y como comentamos anteriormente, calcularemos el valor de la constante de tiempo del circuito τ en distintas situaciones.

4.3.1. Medida de la constante de tiempo τ de un circuito RC.

La ecuación 4.5 nos proporciona una expresión teórica para la tensión del condensador cuando se está cargando. Cuando el tiempo t , contado desde el inicio del proceso de carga, es igual a RC , el valor de la tensión es:

$$V_C(\tau) = V_0(1 - e^{-\frac{RC}{RC}}) = V_0(1 - e^{-1}) \simeq 0,632V_0 \quad (4.6)$$

Es decir que el condensador alcanza el 63.2% de la carga final en el tiempo $t = \tau$.

En esta primera parte de la práctica haremos la medida de la constante τ gracias a un generador de tensión de **onda cuadrada**. Se conecta este generador a nuestro circuito RC en serie. Para observar la tensión del condensador o de la resistencia seguiremos el esquema de la figura 4.2. En el canal 1 observamos la tensión del generador de funciones. En el canal 2 observamos la tensión del condensador. Si queremos observar la tensión de la resistencia R , intercambiamos los elementos R y C .

Fijamos el voltaje de la fuente entre 0 y 1V con una frecuencia de 50Hz. Conectar en serie una resistencia de $1k\Omega$ y un condensador de $1\mu F$.

- Representar la gráfica de la carga y la descarga del condensador en las gráficas adjuntas al final de esta práctica.

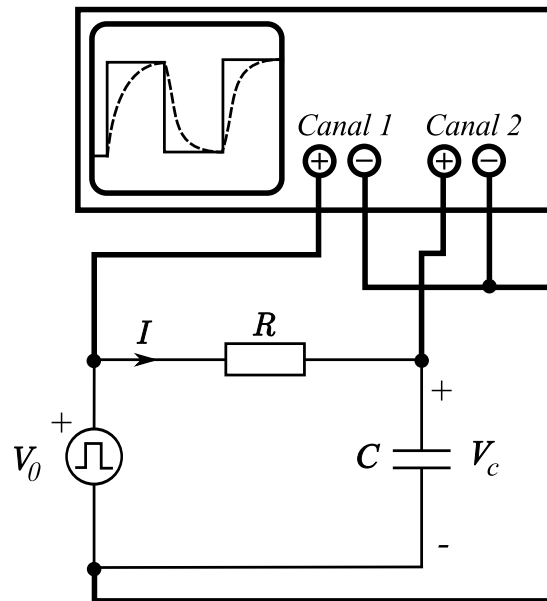
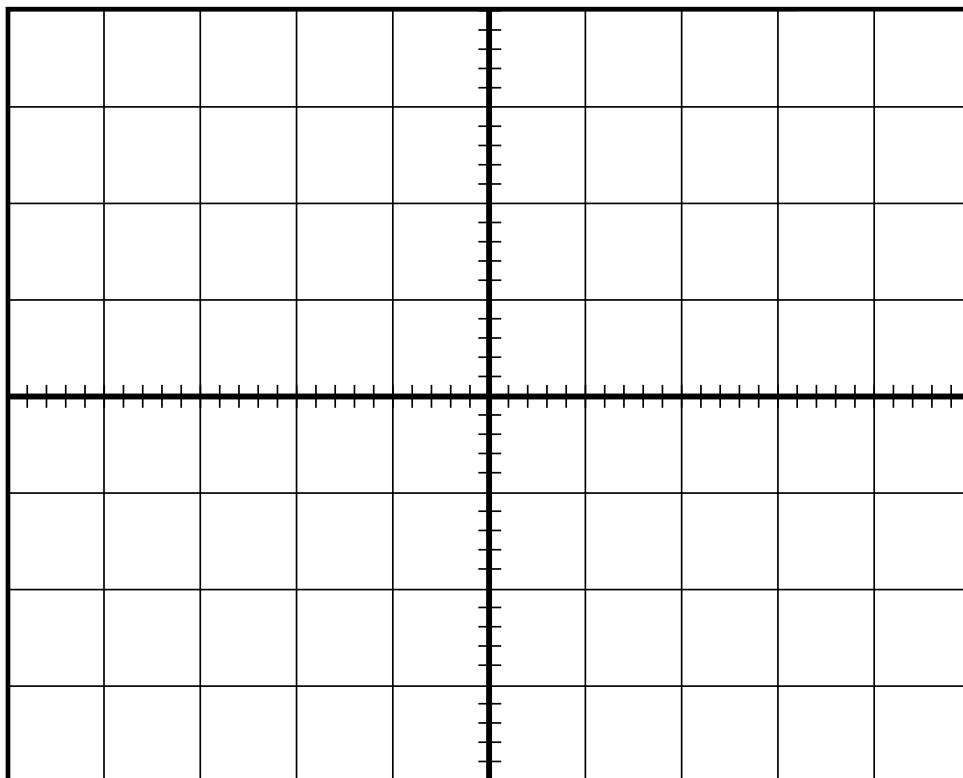


Figura 4.2: Montaje experimental para medir las tensiones del circuito. En el canal 1 Se visualiza la tensión de alimentación mientras en el canal 2 se visualiza la tensión V_C .

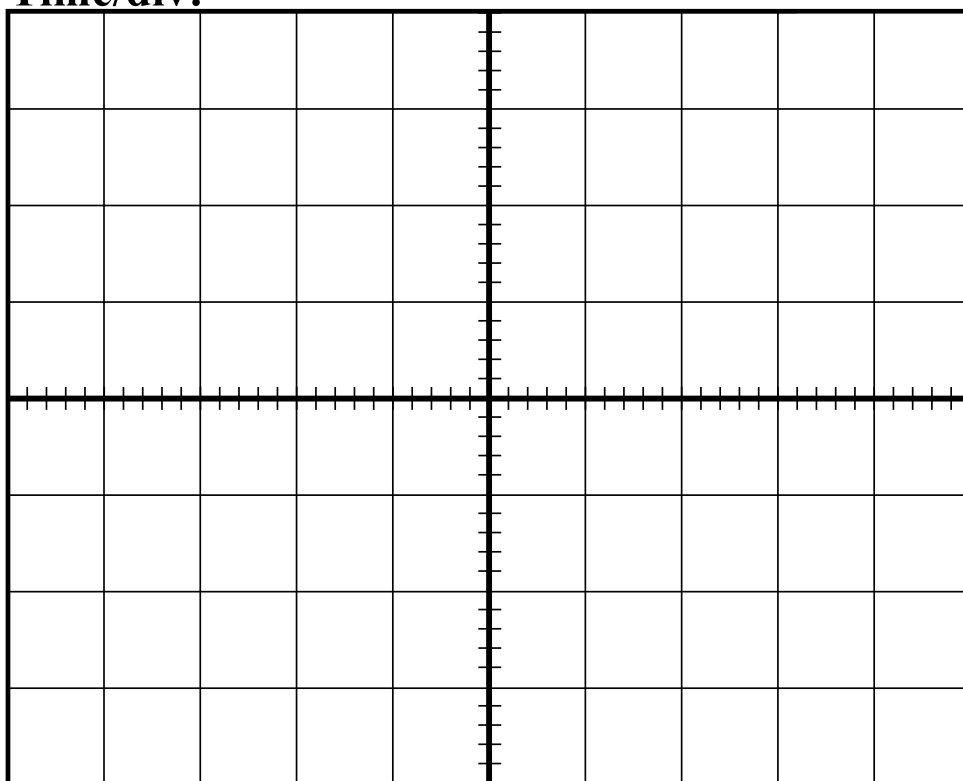
- A partir de la gráfica obtenida, medir la constante de tiempo.
- Repetir para una resistencia de $10\text{k}\Omega$. Cambiar la frecuencia del generador si hiciera falta.



Ch1: **V/div**

Ch2: **V/div**

Time/div:



Ch1: **V/div**

Ch2: **V/div**

Time/div:

4.4. Discusión

- Discutir cualquier otro resultado o problema de interés encontrado en el experimento.

4.5. Cuestiones

1. Representar en la misma gráfica las medidas de la carga del condensador junto con la gráfica de la ecuación (4.5).

Capítulo 5

Momento de espiras en campos magnéticos

5.1. Objetivos

Un bucle conductor que transporta una corriente submergido en un campo magnético uniforme experimenta un par de torsión. Se puede caracterizar el par como una función del radio, del número de vueltas y la corriente en el bucle conductor y de la intensidad del campo externo.

5.2. Fundamento teórico

Un conductor definiendo un bucle cerrado C y recorrido por una corriente I define un momento magnético:

$$\vec{m} = \frac{I}{2} \int_C \vec{r} \times d\vec{r} = I \int_A d\vec{\Omega} \quad (5.1)$$

donde A es el area del bucle y $d\vec{\Omega}$ un vector elemento de superficie con dirección normal a la superficie (su orientación dependerá de la corriente). Un campo magnético \vec{B} ejerce un torque \vec{T} sobre un momento magnético:

$$\vec{T} = \vec{m} \times \vec{B} \quad (5.2)$$

Si el campo magnético no es uniforme, las partes individuales del bucle conductor están sometidas a diferentes pares de torsión. Es por lo tanto, conveniente para introducir el bucle conductor en un campo magnético uniforme. Las dos bobinas se disponen como mostrado en la figura 5.1. Se separan las bobinas de Helmholtz con una distancia igual a su radio, se utilizan para producir un campo magnético uniforme. Para el presente caso, en el que el bucle conductor es un anillo de corriente plano de diámetro d y n vueltas el momento

$$\vec{m} = InA\vec{u} \quad (5.3)$$

con \vec{u} un elemento normal a la superficie. En módulo:

$$|\vec{m}| = In\frac{\pi}{4}d^2 \quad (5.4)$$



Figura 5.1: Montaje experimental.

Si fluye una corriente I' en las bobinas de Helmholtz, podemos hallar el modulo del par de torsión:

$$|\vec{T}| = cII'nA \sin \alpha \quad (5.5)$$

donde α es el ángulo entre el vector \vec{B} y el vector normal al bucle \vec{u} . c es una constante que depende de las bobinas de Helmholtz.

5.3. Montaje experimental y Resultados

El montaje experimental se muestra en la figura 5.1. Las bobinas de Hemlholtz deben conectarse en serie y de tal forma que el campo magnético creado entre las bobinas sea uniforme. Una mala conexión provocará un campo casi nulo en el punto a media distancia entre las dos bobinas. **La corriente en las bobinas no debe exceder de 2A durante la práctica.** Los cables de conexión al soporte de la bobina pequeña deben colgar libremente y sin tensión para evitar la aparición de momentos de torsión adicionales.

La balanza de torsión debe calibrarse con frecuencia, puesto que los movimientos de oscilación de la balanza pueden desajustar el cero.

5.3.1. Momento magnético en función del ángulo

En esta sección se propone medir el par de torsión de una bobina en función del ángulos formado pos la espira y las bobinas de Helmholtz. El prodecimiento para realizar las medidas es el siguiente:

1. En ausencia de campo magnético colocar la espira con un ángulo α con respecto al eje de las bobinas de Helmholtz y ajustar la balanza de torsión en cero.
2. Fijar la corriente I de la espira.
3. Se aumenta progresivamente la corriente de las bobinas de Helmholtz hasta alcanzar la corriente I' determinada de antemano mientras que a la vez se compensa el par con la balanza de torsión de manera que se conserve el ángulo de 15° .

Realizar las siguientes medidas para desviaciones de 0 a 90° empleando el protocolo anterior usando la espira de $n = 3$ vueltas. Elegir para estas medidas una corriente I e I' . Estos valores se usarán para todo el experimento. Es recomendable realizar varias medidas para cada ángulo con fin de reducir el error experimental. Cuidado al tomar las medidas dado que la escala de la balanza de torsión está en mNm.

T (Nm)	I' (A)	α	I (A)

- Representar gráficamente el par de torsión en función del seno del ángulo α .
- Hacer un ajuste lineal de T en función del $\sin \alpha$. Comparar el valor de la pendiente y de la ordenada en el origen con los resultados teóricos obtenidos con la ecuación 5.5.
- Deducir la constante c de las bobinas de Helmholtz.

5.3.2. Momento magnético en función de la intensidad de corriente

Para este apartado se mantiene un ángulo constante así como la corriente de la espira. Se debe medir el par de torsión en función de la corriente I' de la bobina de Helmholtz. Es recomendable realizar varias medidas para cada ángulo con fin de reducir el error experimental.

T (Nm)	I' (A)	α	I (A)

- Representar gráficamente el par de torsión en función de la corriente I' .
- Hacer un ajuste lineal de T en función de I' . Comparar el valor de la pendiente y de la ordenada en el origen con los resultados teóricos obtenidos con la ecuación 5.5.

5.3.3. Momento magnético en función de las características de la espira

En este apartado se va a medir la dependencia del torque en función del diámetro y del número de vueltas. Usando el mismo método que el apartado anterior, realizar las tareas propuestas a continuación.

Usando unas corrientes I e I' fijas así como un diámetro constante medir el torque en función del número vueltas de la espira:

T (Nm)	n

$$I = \quad I' = \quad \alpha =$$

- Representar gráficamente el par de torsión en función del número de vueltas.
- Hacer un ajuste lineal de T en función de n . Comparar el valor de la pendiente y de la ordenada en el origen con los resultados teóricos obtenidos con la ecuación 5.5.

Usando unas corrientes I e I' fijas así como un número de vuelta constante medir el torque en función del diametro de la espira:

T (Nm)	d (cm)

$$I = \quad I' = \quad \alpha =$$

- Representar gráficamente el par de torsión en función del diámetro.
- Hacer un ajuste lineal de T en función de d^2 . Comparar el valor de la pendiente y de la ordenada en el origen con los resultados teóricos obtenidos con la ecuación 5.5.

5.4. Discusión

- Discutir cualquier otro resultado o problema de interés encontrado en el experimento.

5.5. Cuestiones

1. ¿Para qué ángulo la torsión es cero? ¿Que ocurre en esta posición?
2. ¿Tiene alguna aplicación práctica en ingeniería este fenómeno?

Capítulo 6

Capacidad de esferas metálicas

RECOMENDACIÓN IMPORTANTE: ES IMPORTANTE RESPETAR LAS NORMAS DE SEGURIDAD EN ESTA PRÁCTICA. LA RESISTENCIA DE PROTECCIÓN DE $10M\Omega$ DEBE DE ESTAR CONECTADA EN TODAS LAS MEDIDAS.

6.1. Conceptos aplicados

Se trata de determinar las cargas inducidas en condensadores esféricos sometidos a distintos voltajes. Se deduce la capacidad a partir de las medidas experimentales y se contrastan con los valores teóricos.

6.2. Fundamento teórico

La capacidad de un conductor se define como la relación entre su potencial absoluto y la carga almacenada:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (6.1)$$

Esta relación depende únicamente de la geometría del conductor y es constante para un conductor no deformable. La capacidad de una esfera conductora de radio R se puede calcular teóricamente a partir de las leyes de la electrostática:

$$C = 4\pi\epsilon_0 R \quad (6.2)$$

Cuando se aplica una diferencia de potencial entre dos conductores aparece una carga igual en magnitud pero de signo opuesto en cada uno de los conductores. El conjunto formado por ambos conductores se denomina condensador y lleva asociado una capacidad que relaciona la carga almacenada con la diferencia de potencial entre ambos conductores:

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \quad (6.3)$$

Esta capacidad depende únicamente de los materiales en el espacio alrededor de los conductores y de su geometría (forma, situación en el espacio...).



Figura 6.1: Montaje experimental de la parte 1.

6.3. Montaje experimental y Resultados

6.3.1. Determinación de la capacidad de esferas metálicas

El conductor esférico pequeño ($d = 2\text{cm}$) se coloca sobre un soporte cilíndrico de material aislante y se conecta al polo positivo de la fuente de alto voltaje. Se asocia en serie con el conductor esférico una resistencia de protección de $10\text{ M}\Omega$ mientras el polo negativo de la fuente se conecta a tierra. La esfera pequeña se pone en contacto brevemente con las esferas de ensayo para cargar estas últimas. Después de la operación de carga de la esfera de prueba se debe poner la fuente de alto voltaje a 0V . Para cada medida se incrementa en 1000V la tensión V_2 de alto voltaje. Antes de ser cargadas de nuevo, las esferas de prueba se descargan poniéndolas en contacto con el cable de conexión a tierra.

La carga eléctrica de las esferas de prueba se determinará mediante un amplificador de medida. Mediante un adaptador banana-BNC se conecta un condensador de $C_{ca} = 10\text{nF}$ en paralelo con la entrada de alta impedancia del amplificador. El valor de la capacidad C_{ca} debe de comprobarse con ayuda de un polímetro apto para medir capacidades. La capacidad de los conductores esféricos se determinan a partir de los valores de tensión V_1 medidas con ayuda del amplificador.

La tensión medida V_1 a la salida del amplificador permite determinar la carga Q de la esfera:

$$Q = (C + C_{ca})V_1 \quad (6.4)$$

Siendo C_{ca} el condensador auxiliar en paralelo con la entrada del amplificador. Este condensador tiene una capacidad mucho más alta que la capacidad del conductor esférico $C \ll C_{ca}$ y por lo tanto:

$$Q \simeq C_{ca}V_1. \quad (6.5)$$

Por otro lado la carga de la esfera de prueba se puede hallar sabiendo la tensión del alto voltaje V_2 :

$$Q = CV_2 \quad (6.6)$$

Haciendo uso de las dos ecuaciones anteriores podemos determinar la capacidad C del

conductor conociendo la capacidad C_{ca} .

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{C}{C_{ca}} \quad (6.7)$$

Medir la capacidad del condensador C_{ca} con el polímetro:

$$C_{ca}(\pm\epsilon_{C_{ca}}) =$$

Tomar medidas de la tensión V_1 para distintas tensiones de alto voltaje V_2 en pasos de 1kV para las esferas metálicas de diámetro $R = 1\text{cm}$, $R = 6\text{cm}$.

$R = 1\text{cm}$		$R = 6\text{cm}$	
$V_1(\pm\epsilon_{V_1})$	$V_2(\pm\epsilon_{V_2})$	$V_1(\pm\epsilon_{V_1})$	$V_2(\pm\epsilon_{V_2})$

- Para cada esfera representar en una gráfica V_1 en función de V_2 .
- Calcular el coeficiente de correlación lineal r , la pendiente a y la ordenada en el origen b de la recta de mínimos cuadrados $V_1 = aV_2 + b$.

$$r = \quad a(\pm\epsilon_a) = \quad b(\pm\epsilon_b) =$$

- A partir de la ecuación (6.7) y del ajuste lineal anterior determinar la capacidad de cada esfera.

6.3.2. Determinación de la capacidad de condensadores esféricos

Para determinar la capacidad de un condensador esférico, se modifica el montaje experimental tal como se muestra en la figura 6.2. Los dos hemisferios de Cavendish se juntan para formar una esfera completa con un pequeño orificio circular en la parte superior (ver figura 6.3). Se suspende en el interior una esfera de plástico con superficie conductora mediante un alambre de cobre. El alambre de cobre pasa por el tubo de cristal envuelto en un papel de aluminio para evitar cualquier capacidad parásita. El papel de aluminio no debe tocar los hemisferios.

La esfera interior se conecta a la toma central de la fuente de alimentación de alto voltaje. Se usa el cable de alta tensión en serie con la resistencia de protección de $10\text{M}\Omega$. El borne negativo de la fuente se conecta a tierra. Se incrementa la tensión en pasos de 100V sin superar los 1000V para no dañar el multímetro digital.

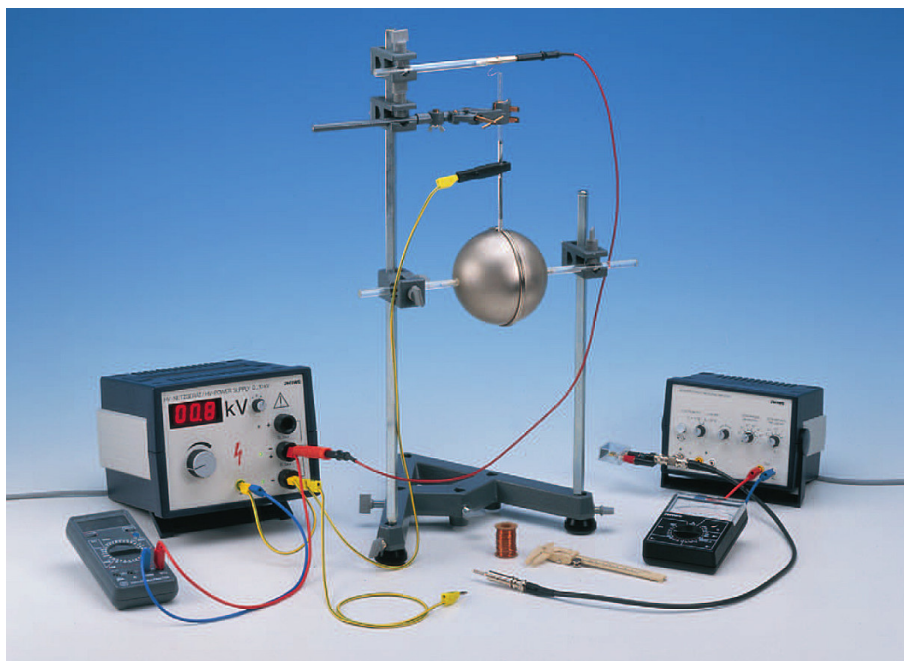


Figura 6.2: Montaje experimental de la parte 2.

La carga se determina de forma similar a la primera parte de la práctica. Se desconecta primero la esfera exterior y apagamos la fuente de alto voltaje. Conectamos a continuación la esfera externa al amplificador de medida para determinar la carga. Entre cada medida se debe descargar la esfera externa poniéndola en contacto con el cable de tierra.

Tomar medidas de la tensión V_1 del amplificador de medida para distintas tensiones de alto voltaje V_2 en pasos de 100V hasta alcanzar los 1000V para el condensador formado por los hemisferios de Cavendish y la esfera interna.

$V_1(\pm\epsilon_{V_1})$	$V_2(\pm\epsilon_{V_2})$

- Representar en una gráfica V_1 en función de V_2 .
- Calcular el coeficiente de correlación lineal r , la pendiente a y la ordenada en el origen b de la recta de mínimos cuadrados $V_1 = aV_2 + b$.

$$r =$$

$$a(\pm\epsilon_a) =$$

$$b(\pm\epsilon_b) =$$

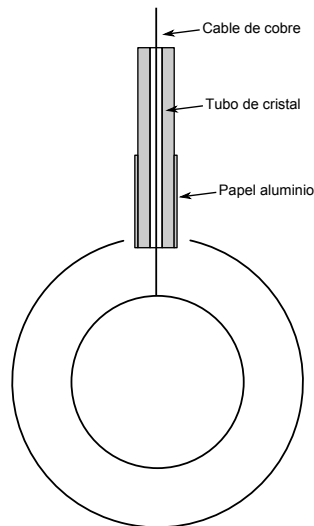


Figura 6.3: Detalle del montaje experimental de la parte 2.

- A partir de la ecuación (6.7) y del ajuste lineal determinar la capacidad del condensador.

6.4. Discusión

1. En el apartado 1 de los resultados, ¿cuáles son los valores teóricos esperados para a y b ? Comparar los valores teóricos con los experimentales, y discutir el resultado en función del coeficiente r y del método experimental seguido.
2. En el apartado 2 de los resultados, ¿cuáles son los valores teóricos esperados para a y b ? Comparar los valores teóricos con los experimentales, y discutir el resultado en función del coeficiente r y del método experimental seguido.

6.5. Cuestiones

1. Deduzca la expresión teórica para la capacidad de un condensador esférico.
2. A partir de los resultados anteriores deduzca el valor de la constante de permeabilidad ε_0 del vacío.

Capítulo 7

Inducción electromagnética

7.1. Objetivo

Se determinará la inducción electromagnética entre dos bobinas como función de la amplitud y la frecuencia de la corriente alterna en la bobina primaria, y de la longitud, número de espiras, y diámetro de las bobinas secundarias.

7.2. Fundamento teórico

Consideremos una bobina, que llamaremos *bobina primaria, exterior* o, simplemente, *grande*, de longitud L , radio R_1 y número de espiras N_1 por la que circula una intensidad de corriente alterna $I(t)$. El *campo magnético* \vec{B} producido por esta bobina en su interior es, aproximadamente uniforme y su valor es el que tiene en su eje. Para verlo, se puede usar directamente la *ley de Biot-Savart*,

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{d\vec{j} \times (\vec{r} - \vec{r}_0)}{|\vec{r} - \vec{r}_0|^3}, \quad (7.1)$$

donde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$ es la *permeabilidad del vacío*. Tomando el eje z como eje de la bobina, calculemos el campo producido en un punto $\vec{r} = z\vec{k}$ del eje. El resultado es

$$\vec{B}(z) = \frac{\mu_0 I N_1}{2L} \left(\frac{z + L/2}{\sqrt{R_1^2 + (z + L/2)^2}} - \frac{z - L/2}{\sqrt{R_1^2 + (z - L/2)^2}} \right) \vec{k}, \quad (7.2)$$

que muestra que el campo magnético en el eje de la bobina es paralelo al propio eje. Si la bobina es larga, se puede aproximar el resultado 7.2 por su valor en el *centro de la bobina*, dado por $z = 0$. Además, se puede despreciar el valor de R_1 frente al valor de L . Se obtiene

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I N_1}{L} \vec{k}, \quad (7.3)$$

que es el valor que tomaremos como *campo magnético en el interior de la bobina primaria*.

Supongamos que, dentro de la bobina primaria, colocamos una *bobina secundaria* más pequeña, de N_2 vueltas y sección A . El *flujo* Φ del *campo magnético producido por la bobina primaria* a través de la bobina secundaria es igual a N_2 veces el flujo a través de

uno de los N_2 filamentos circulares que forman la bobina, esto es,

$$\Phi = N_2 \int_A \vec{B} \cdot d\vec{a}, \quad (7.4)$$

donde $d\vec{a}$ es el elemento diferencial de área en la sección de la bobina secundaria. Es claro que $d\vec{a} = da \vec{k}$, de manera que, usando el campo magnético en el interior de la bobina primaria calculado en 7.3, el flujo en la bobina secundaria es

$$\Phi = N_2 \int_A B da = N_2 BA = \frac{\mu_0 I N_1 N_2 A}{L}, \quad (7.5)$$

que tomaremos como *flujo magnético a través de la bobina secundaria*.

Si la intensidad de corriente I en la bobina varía con el tiempo, es claro que el flujo a través de la bobina secundaria varía con el tiempo. La variación en el tiempo del flujo magnético genera una tensión eléctrica, llamada *fuerza electromotriz* V , que viene dada por la *ley de Faraday*,

$$V(t) = -\frac{d\Phi(t)}{dt}. \quad (7.6)$$

Si, en la bobina primaria, circula una corriente alterna de amplitud I_0 y frecuencia f , se tiene una intensidad de corriente que varía con el tiempo según

$$I(t) = I_0 \cos(2\pi ft). \quad (7.7)$$

A partir de las ecuaciones 7.5, 7.6 y 7.7, se obtiene que la tensión inducida en la bobina secundaria es

$$V(t) = \frac{\mu_0 N_1 N_2 A}{L} (2\pi f I_0) \sin(2\pi ft). \quad (7.8)$$

Por tanto, si lo que se mide es el voltaje eficaz (V_{ef}), su relación con la corriente inductora eficaz (I_{ef}) será:

$$V_{ef} = \frac{\mu_0 N_1 N_2 A}{L} (2\pi f I_{ef}) \quad (7.9)$$

7.3. Montaje experimental

El montaje experimental se muestra en la figura 7.1. Cada bobina secundaria se introduce dentro de la primaria y se mide la tensión inducida en la menor cuando se aplica una intensidad de corriente variable en la exterior. La corriente introducida en la bobina exterior se mide con un polímetro, y la fuerza electromotriz inducida en la bobina secundaria se mide con un voltímetro. Debido a que el multímetro analógico es muy sensible a fluctuaciones, conviene evitar cambios al introducir la corriente en la bobina primaria.

Las frecuencias se deberán seleccionar entre 1 kHz y 12 kHz , ya que, por debajo de 0,5 kHz , la bobina constituye prácticamente un cortocircuito y, por encima de 12 kHz , los instrumentos de medida empiezan a medir inexactamente.

Una vez realizado el montaje hay que estudiar los diferentes factores que influyen en el valor de la fuerza electromotriz inducida. Para ello se dispone de un juego de bobinas en el que se puede variar la longitud de la bobina, el número de espiras, el número de espiras por unidad de longitud y el diámetro de las bobinas. De esta manera se va a estudiar el efecto de las distintas geometrías en la inducción electromagnética.

Además hay otros dos factores que se pueden estudiar, que son el efecto de la frecuencia y de la amplitud y de la intensidad de corriente que circula por la bobina primaria.

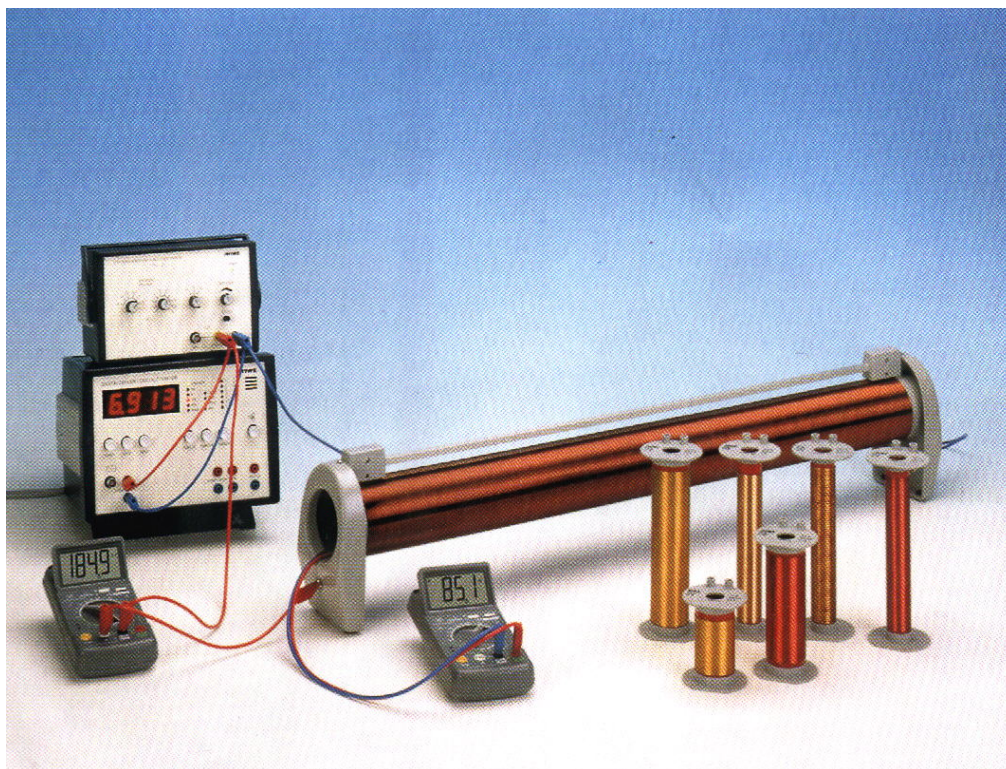


Figura 7.1: Montaje experimental.

7.4. Resultados

7.4.1. Voltaje en función de la corriente

Antes de medir, apuntar los datos de la bobina primaria, es decir, su longitud L y su número de espiras N_1 ,

$$N_1 = \quad L =$$

Escoger una bobina secundaria, y apuntar sus datos geométricos, esto es, su número de espiras N_2 y su diámetro $2R$,

$$N_2 = \quad 2R =$$

Fijando una frecuencia de 10 kHz para la intensidad de corriente aplicada a la bobina primaria, tomar valores del potencial V_{ef} en la bobina secundaria para valores de la amplitud de la intensidad de 0 mA a 50 mA en pasos de cinco en cinco.

$I_{ef}(\pm \varepsilon_{I_{ef}})$											
$V_{ef}(\pm \varepsilon_{V_{ef}})$											

Representar gráficamente el voltaje en la bobina secundaria en función de la amplitud de corriente en la primaria. Calcular el coeficiente de correlación r_1 , la pendiente a_1 , la ordenada en el origen b_1 , y trazar sobre la representación anterior la recta de mínimos cuadrados $V_{ef} = a_1 I_{ef} + b_1$.

$$r_1 = \quad a_1(\pm \varepsilon_{a_1}) = \quad b_1(\pm \varepsilon_{b_1}) =$$

- Haciendo uso de estos datos y con ayuda de la ecuación 7.9 obtenga la permeabilidad del vacío, μ_0 .

7.4.2. Voltaje en función de frecuencia

Manteniendo el montaje del apartado anterior, fijar una amplitud de intensidad de corriente de la bobina primaria de 30 mA . A su vez modificar la frecuencia f de la corriente aplicada a la bobina exterior de 1 kHz a 10 kHz en paso de uno en uno, midiendo el potencial en la bobina secundaria¹. Algunos de los valores de las frecuencias no se pueden obtener con precisión, en tales casos se debe de usar el periodo entero más cercano.

$f (\pm\varepsilon_f)$										
$T (\pm\varepsilon_T)$										
$V_{ef} (\pm\varepsilon_{V_{ef}})$										

Representar gráficamente el voltaje en la bobina secundaria en función de la frecuencia de la corriente en la primaria. Calcular el coeficiente de correlación r_2 , la pendiente a_2 , la ordenada en el origen b_2 , y trazar sobre la representación anterior la recta de mínimos cuadrados $V_{ef} = a_2 f + b_2$.

$$r_2 = \quad a_2(\pm\varepsilon_{a_2}) = \quad b_2(\pm\varepsilon_{b_2}) =$$

- Haciendo uso de estos datos y con ayuda de la ecuación 7.9 obtenga la permeabilidad del vacío, μ_0 . Compare con el valor obtenido anteriormente y con el valor teórico, razonando las posibles diferencias entre estos valores.

7.4.3. Voltaje en función de número de vueltas

Fijar una amplitud de intensidad de corriente de la bobina primaria de 30 mA y una frecuencia de 10 kHz . Introducir bobinas secundarias que tengan distinto número de espiras, pero mismo diámetro, en el interior de la bobina primaria, midiendo su potencial.

N_2	100	200	300
$V_{ef} (\pm\varepsilon_{V_{ef}})$			

Representar gráficamente el voltaje en la bobina secundaria en función del número de espiras.

7.4.4. Voltaje en función de la sección

Fijar una amplitud de intensidad de corriente de la bobina primaria de 30 mA y una frecuencia de 10 kHz . Introducir bobinas secundarias que tengan distinto diámetro, pero mismo número de espiras, en el interior de la bobina primaria, midiendo su potencial.

$2R$			
$V_{ef} (\pm\varepsilon_{V_{ef}})$			

Representar gráficamente el voltaje en la bobina secundaria en función de la sección de la bobina.

¹La frecuencia debe de medirse haciendo uso del osciloscopio.

7.5. Discusión

- De acuerdo con la ecuación 7.9, ¿qué valores se esperaría obtener para a_1 , b_1 , a_2 y b_2 ? Discutir las posibles discrepancias.
- Discutir, también según la ecuación 7.9, los valores obtenidos en los apartados 7.4.3 y 7.4.4: ¿crece el potencial inducido con el número de espiras y con el radio de las mismas de acuerdo con lo que establece la teoría?
- Discutir cualquier otro resultado o problema de interés encontrado en el experimento.

7.6. Cuestiones

1. El campo magnético en un solenoide depende de la densidad de espiras de la bobina. ¿Sucede lo mismo en el caso de la fuerza electromotriz inducida? Justificar la respuesta.
2. Suponer que, en lugar de generar el campo en la bobina exterior, se alimentara la bobina secundaria. Indicar cómo sería la dependencia de la fuerza electromotriz inducida en la bobina exterior en función de la geometría, de la frecuencia y de la intensidad de corriente que circule por la bobina pequeña. Para poder calcularlo, se debe hacer uso del concepto de inductancia mutua.
3. En el caso de la pregunta anterior, indicar si se inducirán fuerzas electromotrices mayores o menores que en las situaciones experimentadas.

Capítulo 8

Pérdida por histerisis de un núcleo ferromagnético

8.1. Fundamento teórico

En esta práctica se va a medir el ciclo de histeresis de un núcleo ferromagnético que aparece al variar la excitación magnética del circuito.

Al circular un flujo magnético por el circuito, unas zonas llamadas dominios magnéticos del núcleo ferromagnético tienden a alinearse en la dirección de la excitación magnética \vec{H} creada por la bobina. El campo total es la suma de la excitación \vec{H} más el campo generado por los propios dominios:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}), \quad (8.1)$$

con \vec{M} el campo creado por el material llamado imanación o magnetización. Cuando todos los dominios están alineados, se dice que el núcleo está saturado. Ya no puede haber creación de campo por parte del material dado que \vec{M} ha alcanzado su máximo. Esta propiedad limita el flujo de los circuitos magnéticos. Pone de manifiesto una relación no lineal entre la excitación generada por las bobinas y el campo magnético en el interior del material.

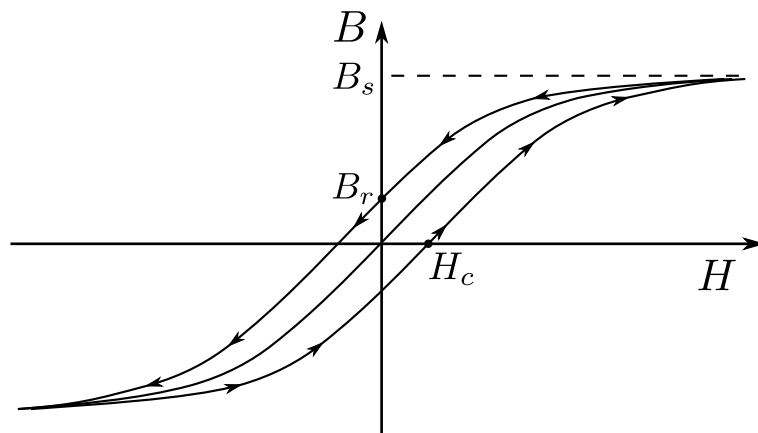


Figura 8.1: Curva de magnetización de un núcleo ferromagnético.

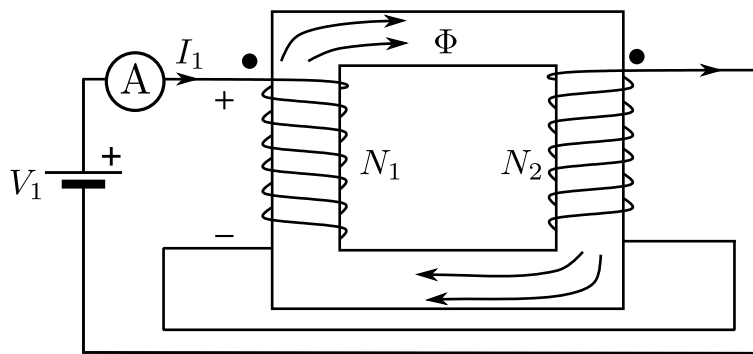


Figura 8.2: Montaje experimental del experimento

El fenómeno de saturación del hierro aparece tanto para corrientes continuas como alternas. Sin embargo, al aplicar corrientes alternas al circuito aparece otro fenómeno no lineal. Al generar un campo externo, los dominios magnéticos se alinean en la dirección de la excitación magnética. Aunque se interrumpa de repente la corriente, parte de los imanes elementales conservan la dirección previa a la interrupción. Un campo magnético permanece y el material guarda la memoria de su estado anterior. Para anular este campo residual se necesita invertir la polaridad de la corriente de las bobinas y aumentarla hasta que desaparezca esta magnetización. La excitación magnética H_c que anula este campo residual se llama campo coercitivo. Este efecto tiene consecuencias importante sobre el consumo de energía de las máquinas eléctricas. Sin embargo es este mismo fenómeno el que permite la construcción de imanes permanentes.

Aplicando un campo externo \vec{H} a un núcleo ferromagnético y cambiándolo para un amplio rango de parámetros se puede observar una curva de magnetización parecida a la figura 8.1. En esta gráfica tenemos varios puntos característicos del circuito:

- B_r el campo remanente que existe cuando se anula la excitación H .
- H_c el campo coercitivo necesario para anular el campo remanente del circuito magnético.
- B_s el campo de saturación del circuito magnético.

8.2. Dispositivo experimental

Para poder visualizar y medir el ciclo de histeresis vamos a usar un dispositivo experimental sencillo consistiendo en un generador, un circuito magnético con dos bobinas acopladas y un amperímetro representado en la figura 8.2. En primer lugar se alimenta la bobina primaria con una tensión continua. En serie con la bobina primaria se coloca un amperímetro para medir la corriente. Las dos bobinas se conectan en serie para poder maximizar el campo de excitación H del circuito (es importante que los campos magnéticos se generen en el mismo sentido).

La ley de Ampère aplicada a lo largo del circuito magnético nos proporciona una relación entre corrientes y excitación:

$$H \cdot l = N_1 I_1 + N_2 I_1, \quad (8.2)$$

8.3. Resultados

A partir de la gráficas obtenidas de ambos núcleos hallar:

1. El campo de saturación del material B_s .
2. El campo remanente B_r .
3. El campo coercitivo H_c .
4. La pérdida en J por ciclo de histeresis (ver párrafo siguiente).

Para medir la energía disipada por ciclo conviene recordar que la energía viene acumulada en el espacio del núcleo ferromagnético en forma de campo magnético:

$$U = \text{Vol} \oint H dB \quad (8.3)$$

Es decir que la energía por ciclo es el área de la curva de histeresis multiplicada por el volumen del material. El área de la curva se puede estimar usando la función `polyarea` de Matlab. Proporcionando una serie de puntos (en orden), el programa estima la superficie de un polígono. Otro metodo consiste en usar papel milimetrado y contar los cuadrados encerrados por la curva. La superficie viene determinada por un factor de escala. Es importante poner las unidades en el sistema internacional en el programa para obtener un valor de superficie en unidades de j.m^{-3} .

8.4. Preguntas

1. Suponiendo que alimentamos el nucleo ferromagnético con una corriente alterna de 50Hz que llegue a saturar el circuito, ¿Cuál es la potencia disipada en pérdidas por histéresis?

Capítulo 9

Efecto Hall en metales

Al aplicar un campo magnético externo a un material conductor de espesor d recorrido por una corriente perpendicular al campo magnético, podemos medir una diferencia de potencial en los lados del conductor. Se debe a la interacción de los electrones circulando en el conductor con el campo magnético, existe una fuerza perpendicular a la corriente que tiende a desviar los electrones a un lado del conductor. La acumulación de electrones en uno de los lados provoca la aparición de una diferencia de potencial entre los lados transversales a la corriente.

La práctica consiste en cuantificar el efecto Hall en función de la corriente I y de la intensidad de campo magnético.

9.1. Fundamento teórico.

Si una corriente I fluye a través de una banda conductora de espesor d y si el conductor se coloca en ángulo recto con respecto a un magnético campo B , la fuerza de Lorentz

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (9.1)$$

actúa sobre los portadores de carga en el conductor, donde \vec{v} es la velocidad de los portadores de carga y q el valor de su carga. Esto lleva a que los portadores de carga se concentren en la parte superior o regiones inferiores del conductor, de acuerdo con su polaridad. Entonces un voltaje llamado voltaje Hall U_H se puede medir entre dos puntos ubicados a ambos lados de la banda conductora:

$$U_H = \frac{R_H \cdot B \cdot I}{d}, \quad (9.2)$$

con R_H el coeficiente de Hall. El tipo de portador de carga se puede deducir del signo del coeficiente de Hall: un signo negativo implica portadores con un signo negativo (efecto Hall normal), y un signo positivo portadores con una carga positiva (efecto Hall anómalo). En metales, los portadores pueden ser negativos, en forma de electrones, o positivos en forma de hueco (falta de un electrón en un átomo). El parámetro importante que permite la aparición de voltaje Hall es la diferencia de movilidad de los portadores de carga: un voltaje Hall puede surgir sólo si los portadores de carga positiva y negativa tienen diferentes movilidades.

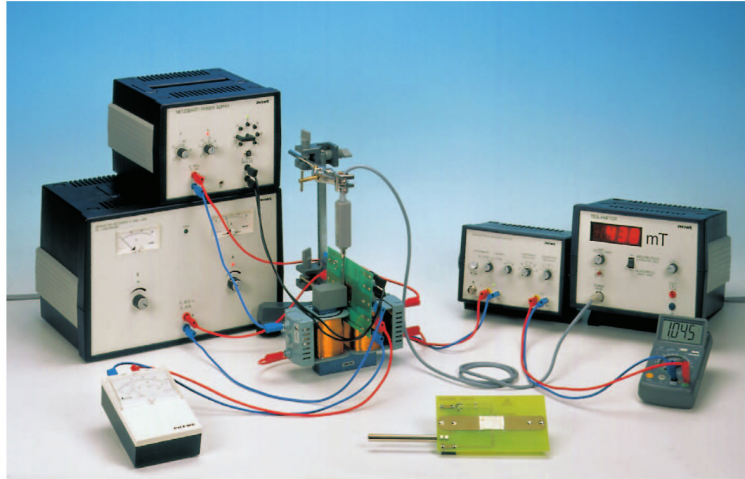


Figura 9.1: Montaje experimental del experimento

9.2. Dispositivo experimental

Para medir el efecto Hall necesitamos un circuito magnético con dos bobinas de 300 vueltas capaces de generar un campo magnético suficientemente fuerte para poder observar el fenómeno. En un intersticio del núcleo ferromagnético se introduce una placa metálica que se conecta a un generador de tensión con el fin de hacer circular una corriente por la placa. En último lugar se dispone de un amplificador de tensión para medir la tensión U_H en los lados paralelos a la circulación corriente eléctrica en la banda metálica. El campo magnético generado en el intersticio se mide con una sonda a efecto Hall.

9.3. Medidas

Para la placa de zinc, medir la diferencia de potencial U_H para distintos valores de la intensidad de corriente que circula por la placa. Establecer un campo magnético en el entrehierro cercano a 0,25T y medir este campo.

I (A)	U_H (V)

A partir de los datos obtenidos en la tabla y de la ecuación (9.2) hallar el coeficiente R_H del metal. El espesor de la hoja de metal es $d = 25\mu\text{m}$.

Ahora se fija la corriente de la placa y se varia el campo magnético de las bobinas. Medir el voltaje de Hall en función de este campo magnético:

B (T)	U_H (V)

A partir de los datos obtenidos en la tabla y de la ecuación (9.2) hallar el coeficiente R_H del metal.

9.4. Discusión

- Comentar y discutir los valores obtenidos experimentalmente.
- Comparar los resultados experimentales con los valores obtenidos de la literatura.
- Discutir cualquier otro resultado o problema de interés encontrado en el experimento.

9.5. Cuestiones

1. ¿Estamos en presencia de un efecto Hall normal o anómalo?
2. Dibujar la banda metálica con las corrientes y los campos involucrados.