

## SESIÓN 1

### 1. Título: Teoría de errores

**2. Objetivo:** Esta sesión está dedicada a analizar los aspectos más importantes asociados a las medidas y su incertidumbre (teoría de errores). Se tratarán, básicamente, los aspectos recogidos en el documento “2\_FFI\_Resumen-y-ejemplos\_TeoriaErrores.pdf”

Es una clase teórico-práctica en la que se resolverán, a través de ejemplos, las dudas relacionadas con la aplicación de los conceptos recogidos en el documento anteriormente citado.

**3. Trabajo previo:** Antes de acudir a esta sesión debéis estudiar el contenido del documento “2\_FFI\_Resumen-y-ejemplos\_TeoriaErrores.pdf”.

**4. Otros conceptos teóricos que se utilizan:** Todas las medidas que tenéis que manejar en los ejercicios propuestos corresponden a magnitudes eléctricas:

- Voltaje: medido en Voltios (V)
- Intensidad de corriente: medida en Amperios (A)
- Resistencia eléctrica: Medida en Ohmios ( $\Omega$ )

Ley de Ohm: Si aplicamos una diferencia de potencial  $V$  entre los extremos de un trozo de conductor a temperatura constante se producirá una corriente  $I$ . El valor de  $V$  necesario para producir una corriente dada depende de una propiedad del material utilizado como conductor. Esta propiedad es su resistencia eléctrica  $R$ , que definimos como:

$$R = \frac{V}{I} \quad \text{donde } R \text{ se expresa en Ohmios } (\Omega).$$

Para muchos conductores, la corriente que circula por ellos es directamente proporcional a la diferencia de potencial aplicada entre sus extremos. En este caso podemos afirmar que  $R$  es independiente de  $V$  e  $I$ :

$$V = I \cdot R \quad (\text{con } R \text{ constante})$$

La anterior ecuación se conoce como ley de Ohm. Aunque más que una ley (no constituye un hecho fundamental de la naturaleza) se trata de una expresión empírica que describe el comportamiento de muchos materiales en el rango de valores de  $V$  utilizados en los circuitos eléctricos. Los materiales que cumplen la ley de Ohm se denominan óhmicos.

**5. Trabajo a presentar:** Se debe entregar al inicio de la sesión 2.

Documento individual en cuya cabecera figure: nombre, dni, número de sesión, grupo de laboratorio y fecha, y que contenga la solución de los siguientes ejercicios:

**Trabajo no presencial**

**NOTA:** en los ejercicios propuestos debes sustituir los dígitos donde figure “x” e “y” por las cifras penúltima y última, respectivamente, de tu DNI

**Ejercicio 1:** A continuación, se presentan diferentes lecturas de un polímetro indicando el fondo de escala con el cual han sido obtenidas. Indica la magnitud con su valor y error asociados. Tienes la primera solucionada.

Lectura	Fondo escala	Magnitud
683	2000 $\Omega$	$R=683\pm 1 \Omega$
1x.y4	20 mA	
1.yx	20 k $\Omega$	
xy.7	200 mA	

Lectura	Fondo escala	Magnitud
14x.y	200 $\Omega$	
y.7x	20 V	
xy0	2000 $\mu$ A	
8y.x	200 k $\Omega$	

**Ejercicio 2:** La diferencia de potencial entre los bornes de una resistencia, por la que circula una corriente de  $xy5 \pm 5$  mA, es de  $5.yx \pm 0.02$  V. Calcula el valor de la resistencia y sus errores absoluto y relativo.

**Ejercicio 3:** Se aplican diferentes valores de voltaje entre los extremos de a una resistencia y se obtienen, para cada uno de ellos, las intensidades recogidas en la siguiente tabla:

$V \pm 0.1$ (V)	2.5	4.3	5.5	6.2
$I \pm 0.15$ (mA)	2.10	3.45	4.65	5.10

Utilizando papel milimetrado representa el voltaje en función de la intensidad y determina, gráficamente, un valor para dicha resistencia.

**Nota:** Como la relación entre V e I es lineal ( $V=R \cdot I$ ) puedes dibujar la recta que, pasando por el origen de coordenadas, mejor entiendas que ajusta a los valores experimentales. La pendiente de esta recta, que puedes calcular fácilmente a partir de cualquiera de sus puntos  $m = y_i/x_i$ , será el valor de R.

## SESIÓN 2

1. **Título:** Medidas directas y propagación de errores.

2. **Objetivos:**

- Realizar un conjunto de medidas directas y asignar correctamente su valor y error.
- Calcular el valor y error de una magnitud que obtenemos a partir de otras magnitudes que hemos medido de forma directa.

3. **Material:** Cada alumno dispone de un juego de 8 resistencias y un polímetro. También hay un panel de conexiones para cada dos alumnos.

4. **Trabajo previo:** Leer el guion completo de esta sesión antes de acudir al laboratorio.

5. **Conceptos teóricos que se utilizan:**

**El polímetro.** Es un dispositivo utilizado para medir magnitudes eléctricas. Seleccionando adecuadamente las conexiones podemos obtener de forma directa valores de resistencia (óhmetro), voltaje e intensidad. Estas dos últimas magnitudes tanto para corriente continua como alterna.

a) Como **óhmetro** (medidor de resistencia eléctrica).

Cuando un polímetro funciona como óhmetro debe estar desconectado de cualquier otra fuente de energía (pilas, condensadores con carga, etc.).

- El terminal negro debe estar en la conexión **COM**.
- El terminal rojo debe estar en la conexión **V/Ω**.



- El dial selector de magnitud y rango debe situarse inicialmente en la escala más alta (indicada por  $\Omega$ ). Experimentalmente se comprobará si esa escala proporciona suficiente precisión. En caso contrario ir modificando el selector a rangos menores hasta encontrar la más adecuada. El desborde de escala, que se produce cuando el valor de la resistencia medida es mayor que el que figura en el fondo de escala seleccionado, queda indicado por una L en la pantalla. El fondo de escala seleccionado determina las unidades del valor digital que aparece en pantalla:  $\Omega$ ,  $k\Omega$  o  $M\Omega$ .

b) Como **voltímetro** (medidor de diferencia de potencial eléctrica).

- El terminal negro debe estar en la conexión COM i el rojo en la conexión V/Ω.

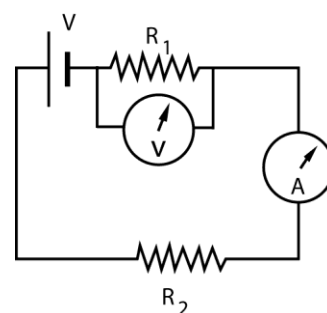
- En el laboratorio de esta asignatura trabajaremos sólo con corriente continua. Si, por ejemplo, el dial selector de magnitud y rango se sitúa en la escala de 20 V (será lo más habitual) proporciona directamente una lectura en voltios, con dos cifras decimales.

c) Como **amperímetro** (medidor de intensidad de corriente eléctrica).

- El terminal negro debe estar en la conexión COM.
- El terminal rojo debe estar en la conexión 10A<sub>MAX</sub>, para valores de intensidad entre 1 y 10 A; y en VmΩA para valores mA y μA.
- El dial selector de escala y rango debe situarse en la escala mayor de la zona de intensidad de corriente continua, indicada por A--- en color negro. Experimentalmente se comprobará si esa escala proporciona suficiente precisión. En caso contrario se cambia el selector a rangos menores: 200 mA, 20 mA, 2000μA, hasta encontrar la escala más adecuada.



**Importante:** Para medir resistencia o voltaje las puntas del polímetro deben colocarse en paralelo con el elemento o elementos a medir. Es decir, una punta en cada extremo del elemento. Por ejemplo, los dos extremos de una pila o dos puntos de un circuito si medimos voltaje, o bien los dos extremos de una resistencia o puntos exteriores de un conjunto de resistencias interconectadas (sin pilas) si utilizamos el polímetro como óhmetro. Sin embargo, cuando medimos la intensidad que circula por la rama de un circuito el polímetro que funciona como amperímetro debe estar en serie (incluido en la rama).

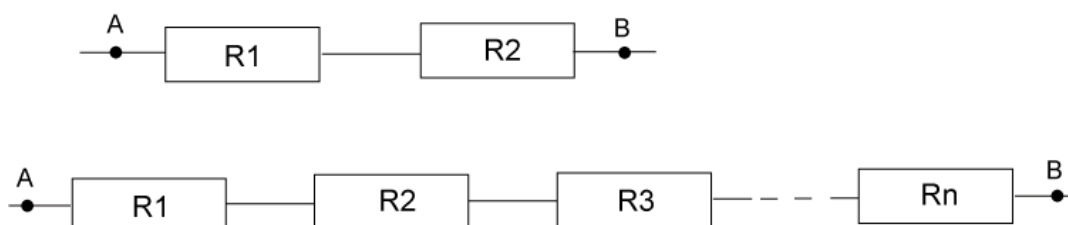


En la figura de la derecha, el polímetro marcado con V estaría actuando como voltímetro, en paralelo con  $R_1$ , por lo que mediría la diferencia de potencial entre los extremos de  $R_1$ . El polímetro marcado con A estaría actuando como amperímetro (montado en serie en la rama del circuito) y mide la corriente que circula por la rama.

### Asociación de Resistencias

**SERIE:** Dos o más resistencias se encuentran conectadas en serie cuando al aplicar al conjunto una diferencia de potencial  $V_{AB}$ , todas ellas son recorridas por la misma corriente.

$$I_{AB} = I_1 = I_2 = \dots = I_n$$



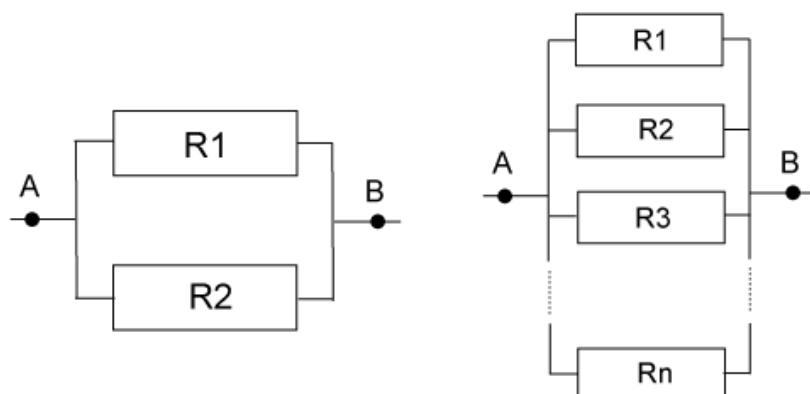
Si  $R_1$  y  $R_2$  están en serie únicamente tienen uno de sus terminales conectados entre sí.

La resistencia equivalente de dos o más resistencias en serie, es decir, el valor total de la resistencia entre los puntos A y B es la suma de las resistencias.

$$R_{AB} = \sum_i R_i$$

PARALELO: Dos o más resistencias se encuentran conectadas en paralelo cuando al aplicar al conjunto una diferencia de potencial  $V_{AB}$ , todas las resistencias tienen dicha diferencia de potencial entre sus bornes.

$$V_{AB} = V_1 = V_2 = \dots = V_n$$



Si  $R_1$  y  $R_2$  están en paralelo deben tener dos terminales comunes.

El inverso de la resistencia equivalente de dos o más resistencias conectadas en paralelo, entre los puntos A y B, es la suma de los inversos de las resistencias individuales:

$$\frac{1}{R_{AB}} = \sum_i \frac{1}{R_i}$$

Cuando tenemos más de dos resistencias en paralelo, generalmente es más cómodo agruparlas de dos en dos y obtener la resistencia equivalente como:

$$\frac{1}{R_{AB}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{R_{AB}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2} \quad \Rightarrow \quad R_{AB} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

## 6. Procedimiento:

Al final de este guion tenéis una hoja con el título: “Sesión 2-Anexo 1” que debéis completar con vuestras medidas.

### a) Medidas directas de resistencias individuales:

- Ordenar las resistencias de menor a mayor (guiaros por el valor proporcionado por el fabricante-figura en cada resistencia)
- Medir las 8 resistencias seleccionando para ello el fondo de escala que proporciona menor error posible.
- Anota el valor, error y unidades de estas medidas en la tabla 1 de “Sesión 2-Anexo 1”

### b) Medidas directas de resistencia equivalente:

- Realiza el primer montaje propuesto en la columna 1 de la tabla 2 ( $R_3$  y  $R_6$  deben ser las mismas resistencias que tienes en la tabla 1 con esa numeración)
- Mide el valor de la resistencia equivalente entre los puntos A y B y anota su valor, error y unidades en la columna 2.

- Procede de la misma forma con el resto de los 5 montajes propuestos.

c) Medidas indirectas:

- Utiliza los valores y errores que tienes anotados en la tabla 1 para calcular el valor y error de la resistencia equivalente en los 5 montajes propuestos en tabla 2. Estos cálculos deben estar realizados en hojas adicionales que se entregarán junto con las tablas 1 y 2.
- Anota tus resultados, con sus unidades, en la tercera columna de la tabla 2.

**Nota:** Todos los valores que incluyas en las tablas 1 y 2 deben ir acompañados de su error y unidades. Además, el valor y el error deben estar correctamente especificados (con arreglo a la normativa).

**7. Conclusiones:**

Compara los valores y errores de las columnas 2 y 3 de la tabla 2 que has completado y comenta los resultados.

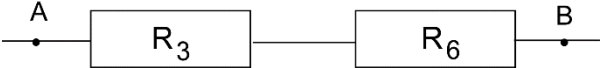
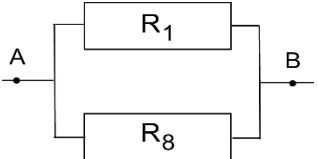
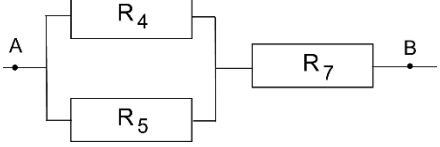
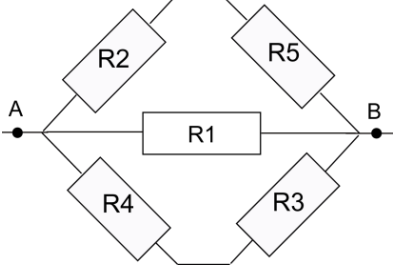
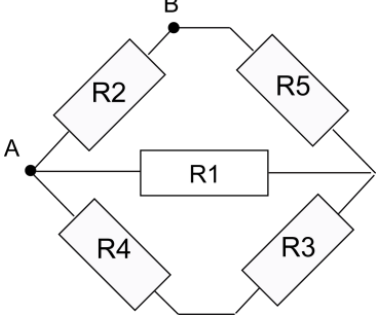
**Entrega al finalizar la sesión:**

- Anexo 1 con las tablas 1 y 2 completadas (en la cabecera debéis poner vuestros datos)
- Hoja, u hojas, con los valores y errores calculados de resistencia equivalente de la tabla 2
- El contenido de vuestras conclusiones, tal como se propone en el apartado 7 de este guion.

**Importante:** Si en el tiempo asignado para la sesión queda alguna, o parte, de estas tareas por realizar, debéis hacer una foto a las hojas que entregáis (o copiaros los datos), para completar el material solicitado en horario no lectivo (trabajo no presencial). Todo lo que esté pendiente de entregar referido a esta sesión se debe presentar, como muy tarde, al inicio de la sesión 3.

Nombre y DNI: \_\_\_\_\_ Grupo \_\_\_\_\_

Tabla 1. Medida directa del valor de 8 resistencias		
$R_1 =$	$R_2 =$	$R_3 =$
$R_4 =$	$R_5 =$	$R_6 =$
$R_7 =$	$R_8 =$	

Tabla 2. Comparación entre el valor medido y el valor calculado de una magnitud		
Resistencia equivalente entre los puntos A y B		
MONTAJE	Valor Medido	Valor Calculado
1) 		
2) 		
3) 		
4) 		
5) 		

## SESIÓN 3

**1. Título:** Medida de magnitudes eléctricas. Ajustes gráfico y analítico.

**2. Objetivos:**

- Montar un circuito sencillo de corriente continua (una malla). Medir la corriente que circula por el circuito para 8 resistencias distintas, cuyos valores han sido medidos con el óhmetro.
- A partir de los valores y errores de  $R_i$  e  $I_i$  realizar un ajuste gráfico y otro analítico que nos permita obtener un valor para la f.e.m. utilizada en la experiencia.
- Medir con el voltímetro el valor de la f.e.m. para comparar con los valores anteriores.

**3. Material:** Un juego de 8 resistencias (individual para cada alumno). Un generador de CC, un panel de conexiones, dos polímetros y una resistencia de carga de  $100\ \Omega$  (común para dos alumnos).

**4. Trabajo previo:** Leer el guion completo de esta sesión antes de acudir al laboratorio.

**5. Procedimiento:**

a) Toma de medidas: Montar el circuito que aparece en la figura 1. El polímetro codificarlo como amperímetro (el interruptor ya está integrado en la cajita de la f.e.m.). La resistencia fija es la de  $100\ \Omega$ , que debe permanecer durante todas las medidas.

En otra parte del panel de conexiones montar el segundo polímetro (codificado como óhmetro) para medir los valores de las distintas resistencias, tal como se muestra en la figura 2.

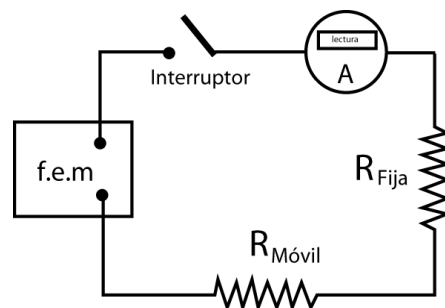


Figura 1

Dado que vamos a realizar una representación gráfica es, didácticamente, importante que los errores de nuestras medidas directas sean suficientemente significativos como para que los valores experimentales puedan ser representados con sus rectángulos de error. Así, aunque alguno de los valores de  $R$  e  $I$  podría ser obtenido con mayor precisión, en esta experiencia vamos a medir todos ellos con el mismo fondo de escala. Utilizaremos:

- Fondo de escala de  $20\ \text{k}\Omega$  para medir todas las resistencias (incluida la resistencia fija,  $R_{\text{Fija}} = 0.10 \pm 0.01\ \text{k}\Omega$ ). Esto permitirá poder dibujar el error de la resistencia total del circuito, que será:  $E_{R_{\text{Móvil}}} + E_{R_{\text{Fija}}} = 20\ \Omega$ .
- Fondo de escala de  $200\ \text{mA}$  para medir las intensidades. Así, todas las intensidades tendrán un error de  $0.1\ \text{mA}$  y se apreciará mucho mejor la variación en los errores de  $1/I$ .

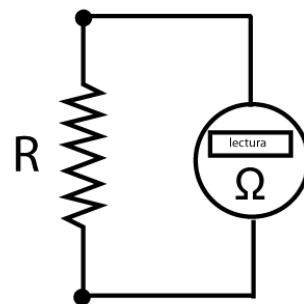


Figura 2



Una vez fijados los fondos de escala se procederá como sigue:

Coger la resistencia  $R_1$ , medir su valor (circuito 2), pasarla al circuito 1 y medir el valor de la corriente que circula por el mismo cuando  $R_1$  está montada. Repetir el proceso con las 7 resistencias restantes. Cada alumno, de los dos que comparten el puesto, debe tener un conjunto distinto de 8 valores de  $R_{Móvil}$  e intensidades  $I_i$  asociadas.

Con la resistencia  $R_8$  montada en el circuito 1, codificar el polímetro del circuito 2 como voltímetro (fondo de escala 20 V) y medir el potencial entre los bornes de la f.e.m. Anotar su valor y error.

A partir de estos valores confeccionar la hoja *excel* que se muestra en la figura 3.

	A	B	C	D	1/I (mA) <sup>-1</sup>			
	R <sub>Móvil</sub>	R <sub>M</sub> ± 0.01 KΩ	I ± 0.1 mA	R <sub>T</sub> ± 0.02 KΩ	Valor		Error	
					Calculado	Ajustado	Calculado	Ajustado
4	R <sub>1</sub>							
5	R <sub>2</sub>							
6	R <sub>3</sub>							
7	R <sub>4</sub>							
8	R <sub>5</sub>							
9	R <sub>6</sub>							
10	R <sub>7</sub>							
11	R <sub>8</sub>							

A continuación de la tabla se deben especificar los valores que se calculan en la misma y como se hace. En nuestro caso:

Columna D:  $R_T = R_F + R_M$ ; Error de  $R_T$ :  $E_{a(R_T)} = \left| \frac{\partial R_T}{\partial R_F} \right| E_{a(R_F)} + \left| \frac{\partial R_T}{\partial R_M} \right| E_{a(R_M)} = E_{a(R_F)} + E_{a(R_M)} = 0.02 \text{ K}\Omega$

Columna E:  $1/I$  (implementa " $=1/C4$ " en casilla E4 y arrastra para calcular el resto de valores)

Columna G: **Especifica aquí como se calcula el error de  $1/I$**  (implementa la fórmula en G4 y arrastra para calcular)

NOTA: En las columnas E y G pueden aparecer todos los decimales que consideréis necesarios, pero en las columnas F y H el valor y error de  $(1/I)$  debe estar especificado conforme a la normativa

Figura 3

Teniendo en cuenta y que  $R_T = V \cdot (1/I)$ . Si comparamos esta relación con la ecuación de una recta:  $y = m x + n$ , y tomamos:  $y = R_T$  y  $x = (1/I)$ .

Entonces:  $n=0$  y  $m=V$ , es decir, la pendiente de dicha recta sería la f.e.m. que se ha utilizado en el experimento. Vamos a calcular el valor de esta pendiente, y por tanto el valor de la f.e.m., de dos formas distintas:

b) Ajuste gráfico: Utilizando papel milimetrado, representa gráficamente la resistencia total del circuito (columna D de la hoja Excell) en función del inverso de la intensidad (columna F). Para realizar la gráfica verifica que se cumplen todos los requisitos que figuran en las páginas 6 y 7 del documento: "2\_FFI\_Resumen-y-ejemplos\_TeoriaErrores.pdf"

Recuerda que en un ajuste gráfico la elección de la recta que entendemos mejor ajusta a nuestros valores experimentales puede hacerse a ojo. Si lo hacemos así tendríamos un valor para la f.e.m., pero no podemos darla con un error. En el caso que nos ocupa (recta que pasa por el origen) podemos seguir el siguiente procedimiento para obtener un valor con su error para la pendiente:

Una vez dibujados los puntos que representan nuestros valores experimentales (con sus rectángulos de error) se dibujan las dos rectas que tocan las esquinas de los rectángulos más extremos (ver figura 4). Estas serían las pendientes máxima y mínima y cualquier valor comprendido entre ellas puede ser válido.

Tomaremos el valor medio de estas dos pendientes como valor para nuestra f.e.m.

$$\langle m \rangle = \frac{m_{Max} + m_{min}}{2}$$

y como error el valor medio de la distancia entre ellas:

$$\langle E_m \rangle = \frac{m_{Max} - m_{min}}{2}$$

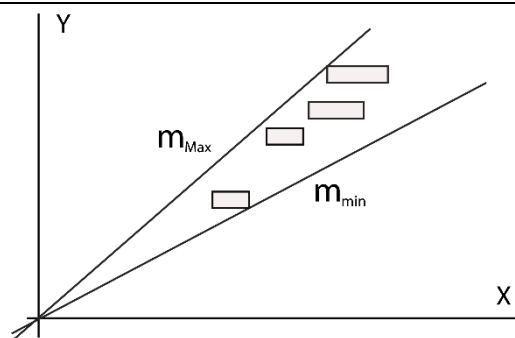


Figura 4

c) Ajuste analítico: introduce los valores de resistencia total del circuito y del inverso de la intensidad en la hoja de cálculo excell: "5\_Ajuste minim\_cuadr - hasta 19 datos.xls", manteniendo la identificación que hemos hecho anteriormente, es decir,  $y = R_T$  y  $x = (1/I)$ .

Dado que la recta teórica debe pasar por el origen verifica (coméntalo con tus valores) que el valor de  $n \pm E_n$ , engloba al cero. A partir de tus resultados proporciona un valor para la f.e.m. con su error.

Comprobarás que aunque el ajuste analítico proporciona un error ligeramente menor que el ajuste gráfico, este no es mucho mejor. Esto no quiere decir que el ajuste analítico sea malo, sino que el ajuste gráfico es bueno.

Hay que tener en cuenta que el error de la f.e.m. que se obtiene en ambos casos está condicionado, fundamentalmente, por el error tan grande con el que hemos obtenido nuestras medidas directas con el fin de poder dibujar los rectángulos de error. El error de la f.e.m., por ambos métodos, se puede reducir significativamente si en nuestras medidas directas utilizamos los fondos de escala apropiados.

Finalmente compara, en una tabla, los tres valores y errores de la f.e.m. (especificados conforme a normativa) que se han obtenido mediante los ajustes gráfico, analítico y la medida directa con el polímetro. Comenta los resultados.

**Entrega de documentación para su evaluación:** (se presentará inicio de la sesión 4)

Se elaborará una pequeña memoria con los siguientes apartados.

a) Datos iniciales. Nombre, fecha, grupo y título de la práctica

No es necesario especificar objetivos y procedimiento (figuran en el guion)

b) Resultados. Relación de los resultados obtenidos en los diferentes apartados descritos en el procedimiento. Debe incluir los siguientes anexos:

- La hoja excell (figura 3) completada. No olvidar especificar las operaciones para obtener los valores que figuran en la tabla
- Gráfica que contenga el ajuste lineal para obtener el valor de la f.e.m y su error.
- La captura de los de los valores de m y n con sus errores que proporciona el programa utilizado para realizar el ajuste analítico por mínimos cuadrados.

c) Conclusiones. Comenta los resultados obtenidos

## SESIÓN 4

### 1. Título: Ley de Ampere

### 2. Objetivos:

- a) Determinar al valor máximo del campo magnético en el interior de un solenoide y compáralo con el valor teórico de un solenoide infinito.
- b) Medir el campo magnético a lo largo del eje de un solenoide y verificar la ley de Ampere

### 3. Material. Común para dos alumnos: Una fuente de alimentación de corriente continua, una sonda Hall, un polímetro en modo voltímetro, un solenoide, una regla y cables.

### 4. Trabajo previo: Leer el guion completo de esta sesión antes de acudir al laboratorio.

### 5. Conceptos teóricos:

A partir de las leyes de Biot-Savart y Ampere podemos expresar el campo magnético en el interior de un solenoide infinito, con  $n$  espiras por unidad de longitud y que se encuentra recorrido por una corriente  $I$ , como:

$$B = \mu_0 n I$$

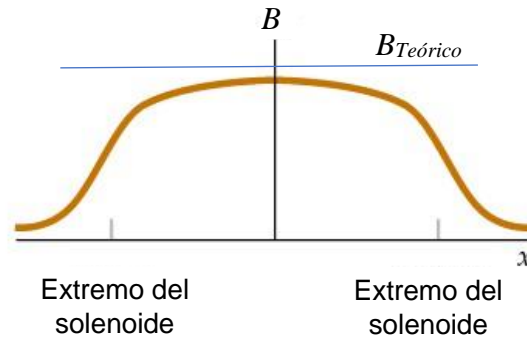
En un solenoide real, de longitud  $L$  y  $N$  espiras ( $n=N/L$ ), la anterior expresión se transforma en:

$$B = \mu_0 \frac{N}{L} I$$

y proporcionaría el valor teórico que podría medirse en el eje del solenoide. En esta experiencia comprobaréis que el valor máximo que se mide en el interior de un solenoide real se aproxima bastante al valor teórico, siendo más parecida cuanto mayor es la relación  $L/R$  ( $R$ =radio del solenoide).

Si se cumple que  $R^2 \ll L^2$ , el campo magnético es aproximadamente constante en su interior y se puede calcular con la anterior expresión.

En la figura 1 se muestra el campo magnético medido en eje central de un solenoide (línea amarilla) en función de la posición en el mismo. El valor que proporciona la ecuación  $B = \mu_0 \frac{N}{L} I$  (valor teórico) es ligeramente mayor que el campo registrado en la zona central del solenoide, donde el campo magnético es prácticamente constante y adquiere su valor máximo.



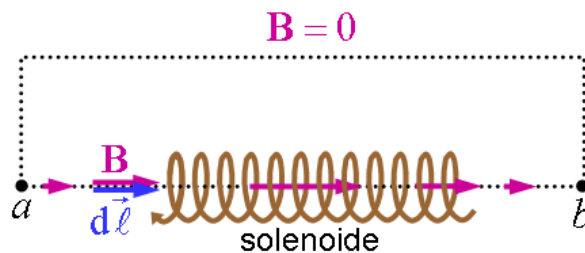
**Figura 1.** Campo magnético en el eje central de un solenoide en función de su posición.

Por otra parte, la ley de Ampere relaciona el campo magnético con las corrientes eléctricas que lo producen:  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I_{enc}$ ; siendo  $I_{enc}$  la corriente de conducción neta encerrada por la trayectoria.

Esta ley podría verificarse experimentalmente midiendo el campo magnético a intervalos  $\Delta l$  a lo largo de una trayectoria cerrada (que encierre las corrientes de conducción del solenoide) y transformando la integral en un sumatorio de elementos discretos.

Matemáticamente:  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} \approx \sum \vec{B} \cdot \Delta\vec{\ell} = \mu_0 NI$ ; Donde  $I_{enc} = NI$ .

En la figura 2 se muestra, mediante una línea punteada, un ejemplo de una trayectoria cerrada a lo largo de la cual habría que medir el campo magnético producido por el solenoide para verificar anterior la ecuación.



**Figura 2.** La integral de línea del campo magnético a lo largo de esta trayectoria cerrada es igual al producto de la permeabilidad magnética por la corriente de conducción neta  $I_{enc}$  que atraviesa el área encerrada por la trayectoria.

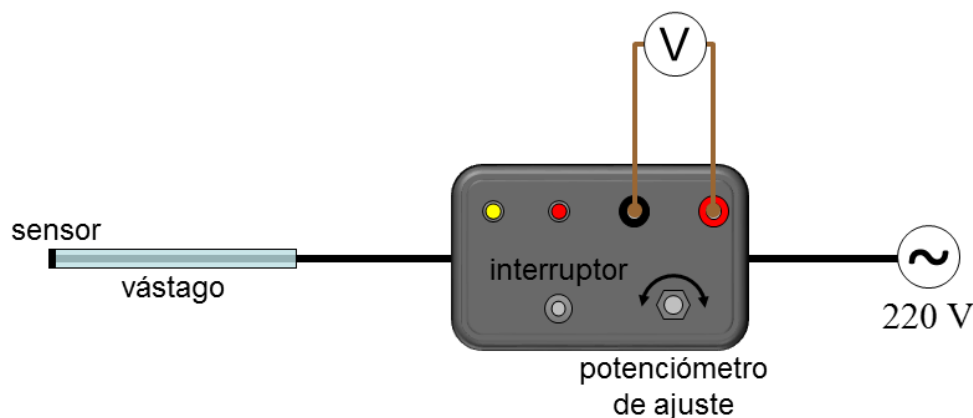
Pero las medidas que habría que realizar en este caso particular serían relativamente difíciles de efectuar, pues también habría que medir el ángulo entre campo magnético y el desplazamiento en algunos puntos de la trayectoria y éste no es constante a lo largo de la misma.

Sin embargo, si se mide el campo magnético a lo largo de la trayectoria desde un punto a hasta un punto b, que estén lo suficientemente alejados como para que el campo magnético del solenoide en estos puntos sea prácticamente nulo, esto no será necesario, ya que entonces el campo magnético a lo largo de la trayectoria desde b hasta a (por la parte exterior del solenoide) será despreciable y no contribuirá al sumatorio:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} \approx \int_a^b \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \int_a^b B dx \approx \sum B \Delta x = \mu_0 NI$$

## 6. Procedimiento:

En esta práctica se usa una sonda Hall para realizar las medidas del campo magnético. La sonda proporciona una diferencia de potencial proporcional al campo magnético, la cual puede medirse mediante un voltímetro (figura 3). La caja tiene dos bornes en los cuales debe estar conectado el voltímetro y dispone de un potenciómetro con el que se ajusta una diferencia de potencial próxima a cero en ausencia de campo magnético. Para hacer funcionar la sonda se debe accionar el interruptor de la caja. El led rojo indica que la sonda Hall está en funcionamiento, mientras que el led amarillo nos indica que el enchufe está conectado a la red.



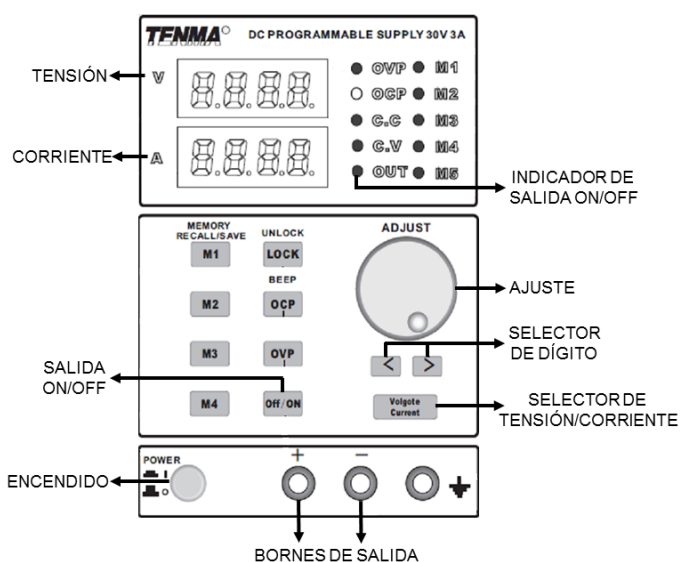
**Figura 3.** Caja de la sonda Hall para medir el campo magnético.

**IMPORTANTE:** La sonda Hall necesita calentarse para un óptimo funcionamiento. Nada más llegar al puesto de trabajo conectarla a la corriente y accionar el interruptor de encendido. Esperar al menos 5 minutos antes de medir con ella. Mantenerla encendida mientras dure la experiencia.

Por otra parte, se dispone un solenoide que debe estar conectado a los bornes de salida de una fuente de alimentación de corriente continua, cuyo frontal se muestra en la figura 4. Se utilizará esta fuente de alimentación como generador de corriente continua de  $I = 1$  A. La fuente dispone de una pantalla que indica la tensión e intensidad que proporciona al estar en funcionamiento.

Al encender la fuente (botón *power*) debería indicar  $V = 5.00$  V e  $I = 1.000$  A. Si no es así, hay que ajustar la tensión y corriente a esos valores, pues se debe limitar la intensidad de corriente a 1 A para evitar dañar el solenoide. Para ajustar los valores pulsa el botón selector tensión/corriente y elige la magnitud a modificar. Un dígito parpadea, indicando que se puede modificar: gira el ajuste hasta que el dígito tenga el valor deseado. Para cambiar el dígito a modificar pulsa los botones “selector de dígito”.

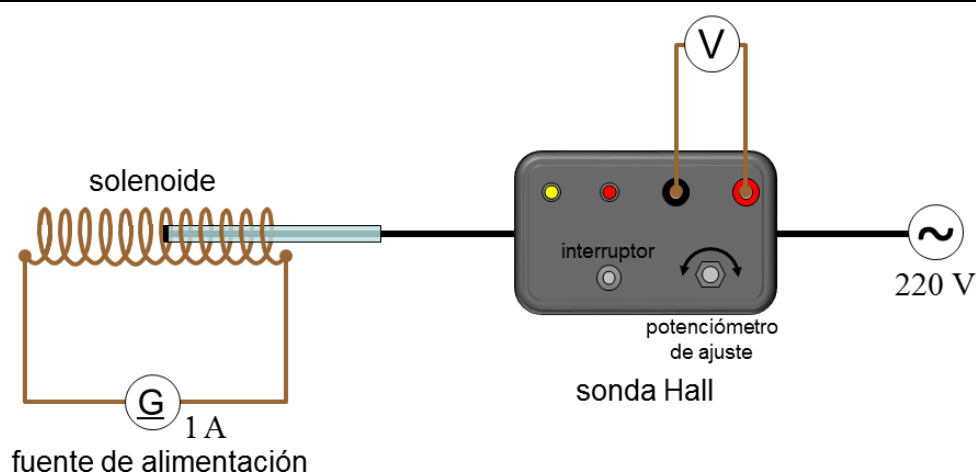
Aunque la fuente de alimentación está encendida aún no pasa corriente por el solenoide, por lo que es el momento de hacer el ajuste  $V_0$  de la sonda. Para ello introduce el vástago de la sonda Hall (que



**Figura 4.** Controles de la fuente de alimentación.

ya debía estar en ON desde hace 5 minutos) en el interior del solenoide y colocarlo en el centro el mismo (figura 5). Ahora el voltímetro conectado a la sonda debería marcar 0 voltios, pero es posible que en la zona donde se encuentra la punta del vástago haya un pequeño valor de  $B$  (por campo magnético terrestre u otras influencias magnéticas) por lo que el polímetro marcará un valor, pequeño, pero distinto de cero. Utiliza el potenciómetro de la sonda y ajusta para que el voltímetro indique una diferencia de potencial próxima a 0.0 mV. Usa la escala de 20 V del voltímetro para el ajuste inicial, luego pasa a la escala de 200 mV para realizar el ajuste fino. Anota el valor de la tensión  $V_0$  que has ajustado con su error, dado por la sensibilidad del voltímetro.

Nota: no es imprescindible que  $V_0 = 0$ , ya que su valor se debe de restar del valor medido cuando circula corriente por el solenoide. Pero incluso aunque consiguierais  $V_0 = 0$ , también debéis considerar el error del aparato de medida para este valor  $\Rightarrow V_0 = 0.0 \pm 0.1 \text{ mV}$



**Figura 5.** Montaje para medir el campo magnético producido por un solenoide.

Ahora ya podemos realizar medidas del campo magnético. Para determinar el campo magnético  $B$  (en T) a partir de la tensión registrada por el voltímetro  $V$  (en mV) debes usar:

$$B = S(V - V_0)$$

donde  $S$  es la sensibilidad de la sonda Hall (su valor está en la propia sonda) y  $V_0$  es la diferencia de potencial (en mV) medida con el voltímetro cuando no pasa corriente por el solenoide, esto es, en ausencia del campo magnético.

Al final de este guion disponéis de dos hojas (Anexo 1) que iréis rellenando con las medidas y operaciones que en ellas se especifican.

**Para completar la práctica seguiremos los siguientes pasos:**

a)  $B_{\text{máximo}}$  en el interior del solenoide:

- A partir de montaje de la figura 5, con la fuente de alimentación ajustada a 5 V y 1 A, activa la salida **SALIDA ON/OFF** de la misma (véase su localización en la figura 4). Sólo cuando esta salida está en **ON** circula corriente por el solenoide. Se puede comprobar en la pantalla digital de la fuente que la corriente disminuye ligeramente (es algo menor de 1 A) y que tiene 3 decimales. Anota esta lectura como valor y error de  $I$  en la hoja de resultados, ya que es lo que se utilizará para los cálculos. Desactiva inmediatamente la salida de la fuente de alimentación pulsando de nuevo el botón **SALIDA ON/OFF** para evitar que el solenoide se caliente en exceso. Este pulsador sólo debe estar en **ON** el tiempo necesario para realizar una medida.

- Medir y anotar en la hoja de resultados la longitud del solenoide  $L$  (sólo la parte donde hay espiras). Anota el número de vueltas  $N$  del solenoide (aparece impreso en el mismo) y la sensibilidad de la sonda Hall (su valor está anotado en la propia sonda, en T/mV).
- Activa la salida **SALIDA ON/OFF** de la fuente y mueve la sonda por el interior del solenoide (en el entorno de su centro) hasta encontrar el valor máximo de la tensión registrada en el voltímetro (anota la medida). Desactiva inmediatamente la salida de la fuente de alimentación pulsando de nuevo el botón **SALIDA ON/OFF** y anota el valor que marca el voltímetro sin corriente en el solenoide (será  $V_0$ ). Realiza esta medida tres veces. Traslada los valores a la hoja de resultados y calcula el valor y error de  $B_{\text{máximo}}$  como se indica en la hoja.
- Calcula el campo magnético teórico en el eje del solenoide (correspondería con el valor ideal para un solenoide infinito con  $n=N/L$  espiras por unidad de longitud). Anota su valor y error en el Anexo-1. Compara y comenta los resultados en el apartado de conclusiones.

b) Comprobación de la Ley de Ampere.

- Medir el campo magnético a lo largo del eje axial del solenoide. Tomar medidas a intervalos regulares (se sugiere  $\Delta x = 1.0 \pm 0.1$  cm) desde, y hasta, un punto lo suficientemente alejado del solenoide como para que el campo magnético sea nulo, es decir, cuando el voltímetro indique una diferencia de potencial  $V_0$ . Como referencia se propone tomar 31 medidas: desde el centro de las espiras del solenoide (posición cero, primera medida) y 15 medidas a cada lado de centímetro en centímetro. Apaga la fuente de alimentación después de cada medida, pulsando el botón **SALIDA ON/OFF**, para evitar que el solenoide se caliente en exceso. Realiza las medidas en un sentido y cuando llegues al final realiza una nueva medida en cada punto retrocediendo. Utiliza el valor medio de  $V-V_0$  en los registros de ida y vuelta para calcular un valor de  $B$  y su error en cada punto.
- Utilizando la inserción de gráficos de *Excel* realiza una representación de los valores de  $B$  que has obtenido a lo largo del eje del solenoide frente a la posición  $x$ . Compara cualitativamente tu gráfica con la que aparece en la figura 1. En la figura 6 se muestra un ejemplo de representación, con  $N=300$  espiras y  $L=16$  cm. Línea azul (valor de  $B$ ), línea amarilla (valor de  $\mu_0 \cdot n \cdot I$ )

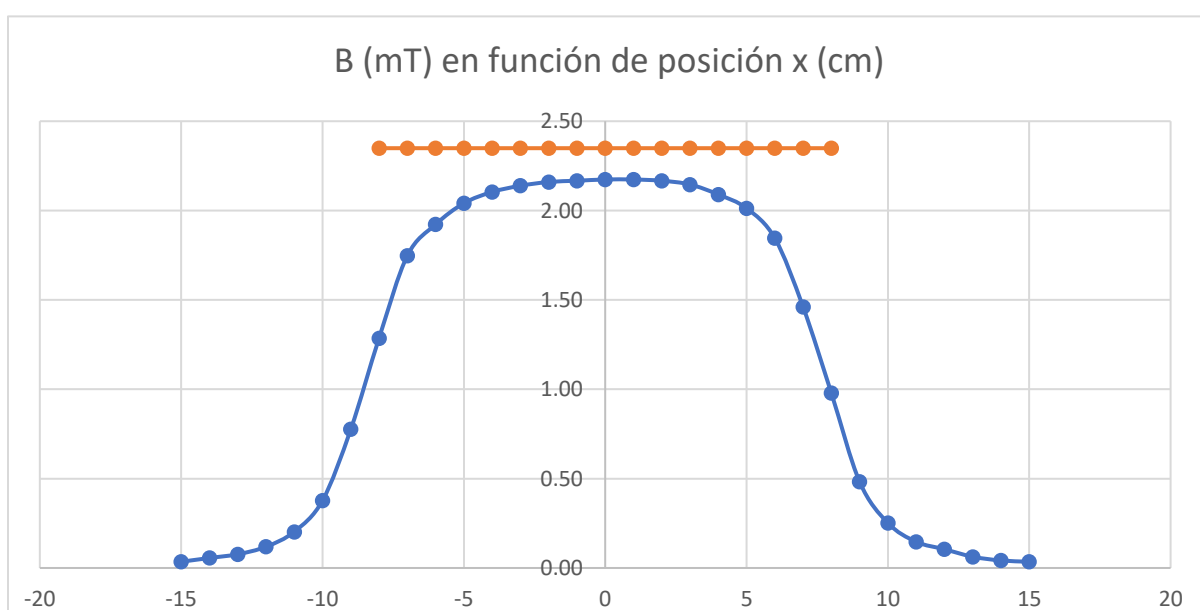


Figura 6

- Con el fin de verificar si se satisface la ley de Ampere, calcula y comprueba que:

$$\sum B \Delta x = \mu_0 N I \cdot$$

Como el valor y error de  $\Delta x = 1.0 \pm 0.1$  es fijo podemos sacar  $\Delta x$  factor común:

$$\sum B \Delta x = \Delta x \sum B$$

Y el sumatorio de B y del error del sumatorio de B son dos valores concretos que tenemos en las casillas suma (columnas E y F) de la hoja *Excel*, por lo que las operaciones resultan muy sencillas. Calcula el valor y error de ambas partes de la igualdad por separado, traslázalas a la hoja de resultados y compáralas.

**Documentación a entregar para su evaluación:** (se presentará inicio de la sesión 5)

Hojas 1 y 2 del anexo 1 de este guion completadas.

Debe incluir los siguientes anexos:

- Impresión de la hoja *excel* que figura en la hoja 2 rellena con tus valores
- La representación gráfica (tamaño folio) que has realizado, con la inserción de gráficos de *Excel*, representando los valores de B frente a la posición x (similar a figura 6 del guion)

*No olvides que los valores y errores finales que proporciones deben estar ajustados conforme especifica la normativa*



Nombre y DNI: \_\_\_\_\_ Grupo \_\_\_\_\_

Valores de I, L, N y S utilizados			
$I \pm 0.001$ (A)	$L \pm 0.1$ (cm)	$N \pm 1$ (esp.)	$S \pm E_s$ (T/mV)

**B máximo en el interior del solenoide:**

	Valores de V en sonda Hall (mV)			Valor y error de $B_{\text{máx}}$ (expresarlo en mT)
	$V_M \pm 0.1$	$V_0 \pm 0.1$	$(V_M - V_0) \pm 0.2$	
Medida 1				$B_{\text{Máx}} = S \langle V_M - V_0 \rangle = \underline{\hspace{2cm}}$  $E_{B_{\text{Máx}}} = S \cdot E_{\langle V_M - V_0 \rangle} + \langle V_M - V_0 \rangle \cdot E_S = \underline{\hspace{2cm}}$
Medida 2				
Medida 3				

Valor medio  $\langle V_M - V_0 \rangle = \underline{\hspace{2cm}} \pm 0.2$  mV

**B teórico en el interior del solenoide:**

$$B_{\text{Teor}} = \mu_0 \frac{N}{L} I = \underline{\hspace{2cm}} \text{ mT}$$

En este caso el error es más fácil calcularlo a partir de los errores relativos:

$$E_B = B \cdot \varepsilon_{\langle B \rangle} = B \cdot (\varepsilon_{\langle N \rangle} + \varepsilon_{\langle L \rangle} + \varepsilon_{\langle I \rangle}) = B \cdot \left( \frac{E_N}{N} + \frac{E_L}{L} + \frac{E_I}{I} \right) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ mT}$$

Valores y errores ajustados			
	$B_{\text{Máx}}$ (mT)	$B_{\text{Teor}}$ (mT)	

**Conclusiones:**

Comenta aquí los resultados que has obtenido (utiliza el reverso de la hoja si es necesario).

### Comprobación de la Ley de Ampere: $\sum B \Delta x = \mu_0 NI$

Se sugiere introducir los valores en una hoja *excel* para facilitar los cálculos. Utilizar las cabeceras que aquí se indican

	A	B	C	D	E	F
1	Posición	Medida 1	Medida 2	V medio		
2	$X \pm 0.1 \text{ (cm)}$	$(V-V_0) \pm 0.2 \text{ (mV)}$	$(V-V_0) \pm 0.2 \text{ (mV)}$	$\langle V-V_0 \rangle \pm 0.2 \text{ (mV)}$	B (mT)	$E_B \text{ (mT)}$
3	15					
4	14					
5	...					
6	... 0 ...	Adjunta la impresión de tu hoja excel con todos los valores				
7	...					
8	-14					
9	-15					
10				Suma =	$\sum B$	$\sum E_B$
11						
12	Columna E: $B = S \langle V_M - V_0 \rangle$ (implementa la fórmula en casilla E3 y arrastra para calcular el resto de valores)					
13	Columna F: Especifica aquí como se calcula el error de B, implementa en F3 y arrastra					
14						

Valor de la parte derecha de la igualdad	$\mu_0 NI =$
Indica cómo se calcula el error de $\mu_0 NI$ y pon su valor	$E_{\mu_0 NI} =$

Valor de la parte izquierda de la igualdad	$\Delta x \cdot \sum B =$
Indica cómo se calcula el error de $\sum B \Delta x$ y pon su valor	$E_{\Delta x \cdot \sum B} =$

Valores y errores ajustados			
	$\mu_0 NI \text{ (mT.m)}$	$\Delta x \cdot \sum B \text{ (mT.m)}$	

### Conclusiones:

Comenta aquí los resultados que has obtenido (utiliza el reverso de la hoja si es necesario).

## SESIÓN 5

**1. Título:** Circuito equivalente de Thévenin.

**2. Objetivos:**

- a) Resolver circuitos de corriente continua
- b) Comprobar experimentalmente el teorema de Thévenin

**3. Material.** Común para dos alumnos: Generador de corriente continua de unos 5 V, juego de resistencias, dos polímetros, placa de conexiones y cables. Para implementar el circuito equivalente se utilizará una fuente de alimentación de tensión regulable y una resistencia variable.

**4. Trabajo previo:** Leer el guion completo de esta sesión antes de acudir al laboratorio.

**5. Conceptos teóricos:**

El teorema de Thévenin establece que cualquier circuito lineal activo con terminales de salida A y B, (tal como se representa en la Figura 1) puede sustituirse por una fuente de tensión  $V_T$  en serie con una resistencia  $R_T$ .

Dicho teorema se aplica a un circuito con el fin de hallar otro circuito, equivalente al anterior, que contenga un número menor de elementos. Así, su resolución y fabricación son más sencillas.

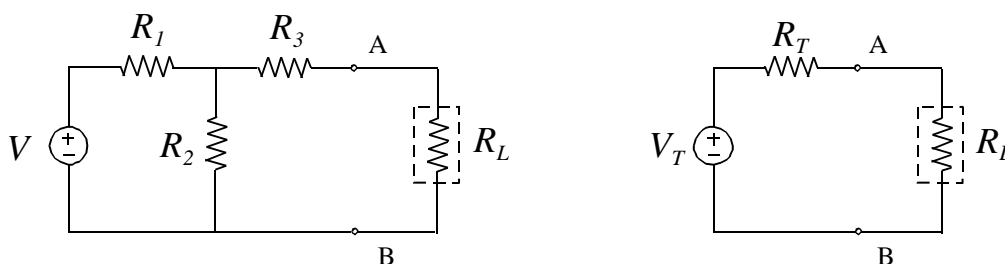


Figura 1.- Circuito equivalente de Thevenin.

La tensión de Thévenin  $V_T$ , es la diferencia de potencial entre los terminales A y B medida en el circuito de la izquierda cuando no existe la resistencia  $R_L$ , es decir, a circuito abierto. La resistencia de Thévenin  $R_T$  es la resistencia eléctrica medida en los terminales A y B cuando todas las fuentes de tensión del circuito son iguales a cero. En general,  $R_L$  representa un circuito de carga cualquiera.

## 6. Procedimiento:

Elige 4 resistencias y utilizando el polímetro como óhmetro mide su valor y error e identifícalas con  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  y  $R_L$  (no hace falta que el orden de valor sea creciente, asigna los valores como quieras). A continuación, monta el circuito de la figura 2 y mide: a) la diferencia de potencial entre los bornes de la fuente de continua  $V$ , y b) la diferencia de potencial entre los puntos A y B. Este último valor es el voltaje de Thevenin  $V_T$ .

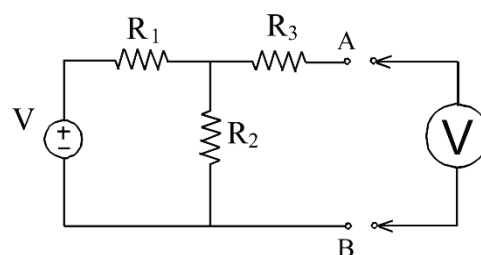


Figura 2

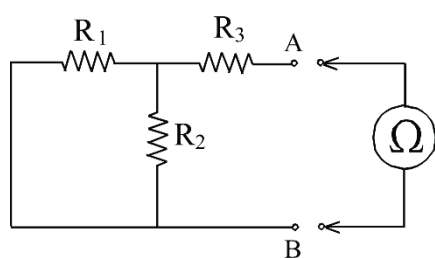


Figura 3

Desconecta la fuente y en su lugar une los bornes con un puente para crear un cortocircuito tal y como se muestra en la Figura 3. Mide la resistencia equivalente  $R_T$  en los puntos A y B.

Calcula teóricamente los valores del potencial y resistencia equivalente de Thevenin:

$$V_T = V_A - V_B = I \cdot R_2 = \frac{V}{R_1 + R_2} \cdot R_2 \quad (1) \quad R_T = R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (2)$$

Compara los valores teórico y experimental de ambas magnitudes.

A continuación, montamos el circuito de la figura 4 donde hemos incluido la resistencia de carga  $R_L$  y un amperímetro, con el que mediremos la corriente que circula por  $R_3$  y  $R_L$ . Con el voltímetro podemos medir la diferencia de potencial entre los bornes de la resistencia de carga.

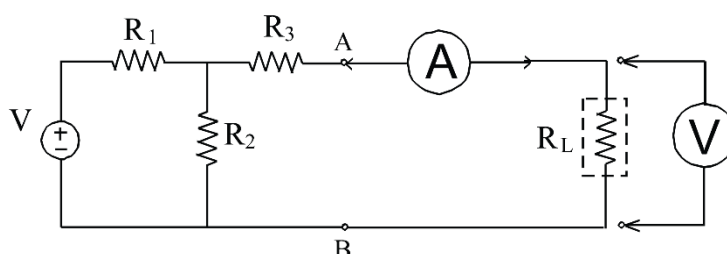


Figura 4.- Medida de la tensión y corriente en la resistencia de carga.

Anota la lectura de voltímetro y amperímetro con sus errores y unidades. Por otra parte, resuelve teóricamente el circuito y calcula el valor de  $I_L$  y de  $V_L$ . Comparar los valores teóricos y experimentales.

$$\begin{aligned} (R_1 + R_2)I_1 - R_2I_2 &= V \\ -R_2I_1 + (R_2 + R_3 + R_L)I_2 &= 0 \end{aligned} \quad (3) \quad \text{Resolviendo este sistema } I_2 = I_L; \text{ y entonces } V_L = R_L \cdot I_L$$

Ahora montaremos el circuito equivalente de Thévenin utilizando la fuente de alimentación con salida de tensión regulable y la resistencia variable:

- Conectamos el voltímetro a la salida del generador y ajustamos su potencial al valor  $V_T$ .

- b) Conectamos el óhmetro a los extremos de la resistencia variable y la regulamos hasta que entre sus bornes presente una resistencia  $R_T$ .

Montamos el circuito de la figura 5 y comprobamos que la corriente que circula por el amperímetro  $I_L$  y la diferencia de potencial entre los extremos de  $R_L$  son los mismos que habíamos obtenido en el montaje de la figura 4. Si es así, se puede asegurar que ambos circuitos son equivalentes.

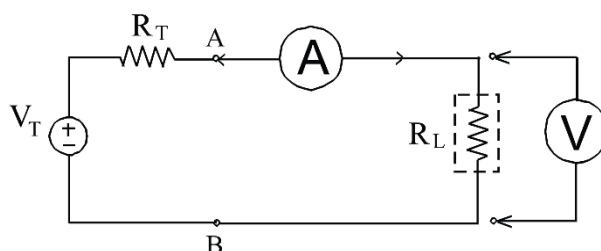


Figura 6. Circuito equivalente de Thevenin

**Documentación a entregar para su evaluación:**

El informe sobre esta experiencia se realizará en el propio laboratorio, durante la 5ª sesión y se entregará al concluir la práctica. En este caso se puede presentar un único documento entre los dos alumnos que comparten el mismo puesto.

Se elaborará una pequeña memoria con los siguientes apartados.

- a) Datos iniciales. Nombre de los dos alumnos, fecha, grupo y título de la práctica

No es necesario especificar objetivos y procedimiento (figuran en el guion)

- b) Resultados.

- Indica los valores y errores de las medidas de  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_L$  y  $V$
- Indica los valores y errores de las medidas de  $V_T$  (obtenido según figura 2) y de  $R_T$  (obtenido según figura 3). Calcula los valores teóricos [ecuaciones (1) y (2)] de estas dos magnitudes y compáralos con los experimentales (no es necesario calcular el error de los valores teóricos)
- Indica los valores y errores de las medidas de  $I_L$  y  $V_L$  (obtenidos según figura 4). Resolver el sistema (3) con vuestros datos para calcular los valores teóricos de estas dos magnitudes y compáralos con los valores experimentales (no es necesario calcular el error de los valores teóricos)
- Hacer una tabla comparativa entre los valores experimentales de  $I_L$  y  $V_L$  medidos con el circuito completo (montaje de la figura 4) y los obtenidos a partir del circuito equivalente de Thévenin (montaje de la figura 5). Comentar las posibles diferencias, si las hubiera.

- c) Conclusiones. Comenta de forma global los resultados de esta experiencia.