

Capítulo 1

Mediciones de corriente continua

1.1. Introducción

Esta primera parte del curso está dedicada al diseño y construcción de circuitos de corriente continua y a la realización de diversas mediciones eléctricas sobre ellos. Respecto del diseño, se deberá aprender a compatibilizar los rangos de valores de tensión, corriente y resistencia que se deseen explorar, con las limitaciones propias de todo circuito real, tales como: máxima corriente que una fuente de tensión puede entregar, máxima tensión que una fuente de corriente puede aplicar, máxima potencia que una resistencia puede disipar, y aquellas inherentes a los instrumentos de medición. Respecto del armado, se deberá adquirir habilidad para construir correctamente circuitos reales a partir de sus correspondientes dibujos esquemáticos. Lo referente a las mediciones eléctricas que sobre tales circuitos se efectúen se tratará a continuación.

1.2. El instrumento básico de medición: el multímetro digital

Existen marcas y modelos tan diversos de multímetros digitales, que es prácticamente imposible describirlos por completo a todos. Lo que un científico hace ante un instrumento específico, es consultar su manual (el que el fabricante entrega con el instrumento, si está disponible, o bien, obtener dicho manual de una fuente confiable, por ejemplo, de la página web oficial de la empresa que lo fabricó).

A pesar de la gran diversidad comentada, los multímetros tienen varias características comunes que pasamos a describir

- **Pantalla digital** Es donde el instrumento indica el resultado de la medición. De



Figura 1.1: Ejemplos de multímetros digitales. Se destacan: la pantalla, llave selectora, bornes de entrada y puntas de prueba.

acuerdo con la calidad del instrumento, presenta más o menos dígitos. Las cantidades más comunes son de 3 dígitos y medio y 4 dígitos y medio. Se denomina medio dígito a uno en el que el instrumento sólo puede marcar el 0 o el 1, a diferencia de un dígito completo, en el que puede marcar desde el 0 al 9, ambos inclusive. El medio dígito ocupa siempre el lugar más significativo (el de más a la izquierda). Por ejemplo, un instrumento de $3\frac{1}{2}$ dígitos tiene por lectura máxima al , mientras que uno de $4\frac{1}{2}$ puede indicar hasta el . El contenido mínimo habitual de la pantalla se completa con: un punto decimal, el signo “-” (menos) cuando corresponde, la unidad en que está expresada la lectura (mV, μ A, k Ω , etc.), y una indicación sobre si la medición de tensión o corriente corresponde a corriente continua (CC o DC en inglés) o alterna (CA o AC en inglés).

Hay instrumentos que en el lugar correspondiente al medio dígito ya mencionado, pueden marcar desde el 2 al 5, ambos inclusive, aunque el 3 y el 5 son los más comunes. En cualquiera de tales casos se habla convencionalmente de $\frac{3}{4}$ de dígito. Por ejemplo, un instrumento de $3\frac{3}{4}$ dígitos puede representar hasta el , o el , de acuerdo a la marca y modelo.

Para evitar la ambigüedad del significado de una “fracción de dígito” se recurre al concepto de *número de cuentas*, que se define como la cantidad máxima de números distintos que el instrumento puede representar en la pantalla, ignorando el signo y el punto decimal. Así, un multímetro que por ejemplo puede indicar hasta el , corresponde a uno de 6000 cuentas (no hay que olvidar el).

- **Llave selectora de función y escala** Al girarla permite seleccionar una entre las funciones que puede prestar el instrumento, y eventualmente, su escala.

Las funciones que como mínimo suelen brindar los multímetros digitales son: voltímetro u amperímetro (tanto sea en DC o AC) y óhmetro. Los modelos más completos suelen incluir: capacitímetro, frecuencímetro, y probador de pilas, diodos y transistores, entre otras.

- **Bornes de entrada y puntas de prueba** Los multímetros digitales tienen al me-

nos 3 bornes de entrada y dos cables, uno negro y otro rojo, cuyos extremos cuentan con terminales apropiados. Uno de los bornes se denomina “COM” (común), dado que se lo utiliza para la mayoría de las mediciones y se lo identifica con esas letras. Para evitar confusiones a la hora de interpretar el signo de la lectura, allí se inserta el cable negro. El otro cable se inserta en alguno de los otros bornes dependiendo de la magnitud que se desea medir. La elección del borne donde se inserta el cable rojo debe ser compatible con la posición de la llave selectora.

A continuación se describirán las características más relevantes de las funciones más comunes

- **Voltímetro en DC**

Generalmente pueden medir desde 1 mV hasta 1000 V. Su resistencia interna suele ser de 1 M Ω , 10 M Ω o 30 M Ω , de acuerdo a la calidad del instrumento, y normalmente no depende de la escala.

- **Amperímetro en DC**

Normalmente pueden medir desde 100 μ A hasta 2 A. Su resistencia interna suele estar comprendida entre 1 Ω y 1 k Ω , y generalmente depende de la escala.

- **Voltímetro y amperímetro en AC**

Los respectivos rangos de medición se extienden desde 1 o 2 V hasta los 750 V y desde 100 μ A hasta 200 mA.

Muy importante: El rango de frecuencias en que los multímetros pueden realizar mediciones de tensión y/o corriente en AC normalmente se extiende desde 10 Hz hasta 1 o 2 kHz. Fuera de ese rango las lecturas no son confiables. Es necesario consultar el manual del instrumento para averiguar los límites de dicho rango de frecuencias.

- **Ohmetro**

Los multímetros digitales pueden también funcionar como óhmetros, esto es, como medidores de resistencia. Para ello, mediante una fuente interna, el instrumento hace pasar por la resistencia incógnita una pequeña corriente conocida y simultáneamente mide la diferencia de potencial entre los extremos de la misma. Dado que la corriente es conocida, la conversión voltaje a resistencia es inmediata, y la efectúa el propio instrumento. La corriente inyectada depende de la escala, sale por el terminal correspondiente a la medición de resistencia, e ingresa por el terminal común. El rango de dichas corrientes abarca desde los μ A hasta las decenas de mA, y depende de la escala.

De lo dicho se desprende que **para medir una resistencia entre dos puntos de un circuito, éste debe estar desenergizado** (todas sus fuentes de energía deben estar desconectadas del mismo), porque de lo contrario, el circuito puede inyectar una corriente inadecuada al instrumento y dañarlo. Aparte de falsear el resultado.

- **Capacímetro**

Algunos multímetros digitales disponen de un circuito interno que les permite medir la capacidad de un capacitor/condensador eléctrico. Los rangos típicos de medición abarcan desde los nF hasta las decenas de μF .

Del mismo modo que con la función descripta anteriormente, **el capacitor bajo prueba debe estar desenergizado antes de conectarlo al capacímetro**, porque de lo contrario, la carga que eventualmente contenga puede destruir el circuito interno ya mencionado. Para asegurarse de que está descargado, conviene retirarlo de todo circuito al que estuviese conectado, y cortocircuitar sus terminales, con cuidado, antes de conectarlo al instrumento de medición.

- **Incerteza de medición**

La incerteza de medición de los multímetros digitales depende de la función y escala en que se los emplee. Si la lectura del instrumento es L , su incerteza, ΔL , se expresa como

$$\Delta L = \pm (x L + n \text{ DmS}) \quad (1.1)$$

donde x es una fracción porcentual, $n \in \mathbb{N}$, y DmS corresponde al dígito menos significativo presentado en la pantalla del instrumento (el de más a la derecha). Los valores de x y n dependen de la función y escala, y de la marca y modelo del mismo. Ambos se consignan en el correspondiente manual.

Ejemplo: Valores típicos para la función y escala correspondientes a mV DC, suelen ser: $x = 0,75\%$ y $n = 2$, de modo que si se tiene una lectura $L = 10,00$ mV, resulta: $\Delta L = \pm (0,075 + 0,02) \text{ mV} = \pm (0,095) \text{ mV}$.

1.3. Medición de la resistencia interna del voltímetro

1.3.1. Método 1

Considere el circuito de la figura 1.2. La tensión de la pila, E_0 , se divide proporcionalmente entre la resistencia variable R y la interna del voltímetro, R_V , de modo que

$$V_R = \frac{R}{R + R_V} E_0 \quad \text{y} \quad V_{R_V} = \frac{R_V}{R + R_V} E_0 \quad (1.2)$$

donde V_R y V_{R_V} son las caídas de potencial en R y R_V , respectivamente.

Si al variar R se llega al caso particular en que $R = R_V$, el instrumento indicará $V_V = E_0/2$ (y sólo en ese caso). Se tiene así un método sencillo y rápido para medir R_V . Se asumió

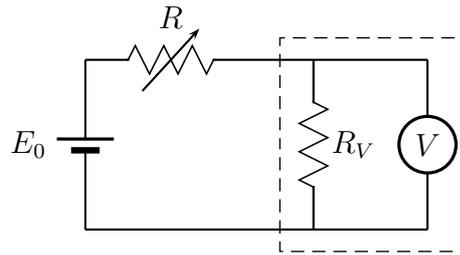


Figura 1.2: Circuito propuesto para medir la resistencia interna del voltímetro.

que $E_0 \neq 0$, que la escala del instrumento permite medir adecuadamente tanto $E_0/2$ como E_0 , y que la resistencia interna de la pila es despreciable frente a R_V .

Observe que el método no pierde su sencillez si se consideran otras posibilidades, tales como: $V_V = E_0/3$, en cuyo caso se deduce que $R_V = R/2$; o $V_V = 2 E_0/3$, lo que a su vez implica $R_V = 2 R$; etc.

1.3.2. Método 2

Si se dispone de un amperímetro puede considerarse el circuito de la figura 1.3. Variando E puede obtenerse un conjunto de valores V_V de caída de potencial en la resistencia incógnita conjuntamente con la correspondiente corriente que por ella circule i_A . Graficando V_V en función de i_A puede obtenerse R_V como la pendiente de la recta de ajuste.

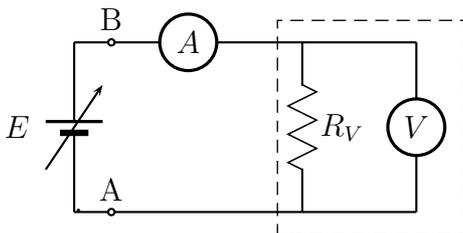


Figura 1.3: Medición de la resistencia interna de un voltímetro empleando un amperímetro y una fuente de tensión continua variable.

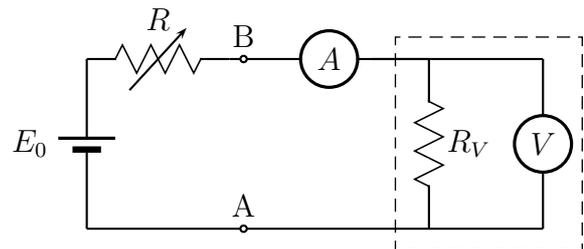


Figura 1.4: Circuito alternativo al de la figura 1.3 si no se dispone de una fuente de tensión continua variable.

Si no se dispone de una fuente de tensión variable, puede armarse el circuito de la figura 1.4. La resistencia R forma un divisor de tensión con la resistencia equivalente del conjunto formado por el amperímetro y el voltímetro, de modo que al variar R , variará también la diferencia de potencial entre A y B .

1.4. Medición de la resistencia interna del amperímetro

1.4.1. Método 1

Considere el circuito de la figura 1.5 en el que una fuente de tensión E alimenta, a través de una resistencia limitadora R_L , a un amperímetro que, llave mediante, tiene conectada una resistencia en paralelo r_P . La resistencia interna del instrumento se representa mediante r_A . El conjunto de valores $\{E, R_L\}$ debe elegirse cuidadosamente para no destruir al amperímetro.

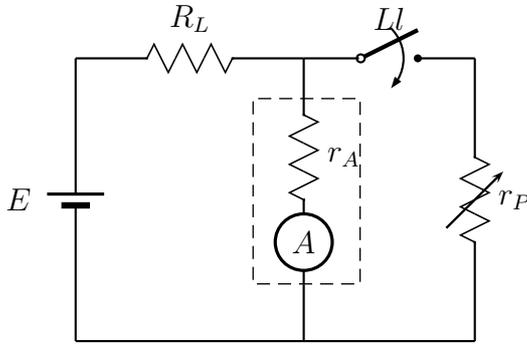


Figura 1.5: Medición de la resistencia interna de un amperímetro. Se asume que $R_L \gg r_A$.

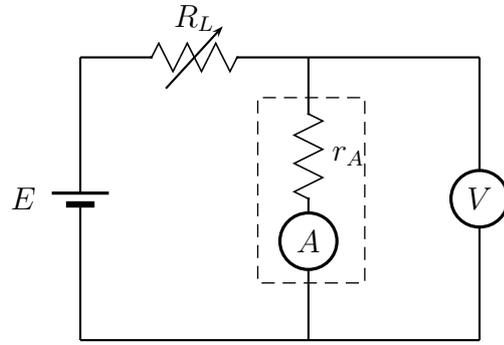


Figura 1.6: Circuito alternativo al de la figura 1.5 si se dispone de un voltímetro.

Supóngase que, con la llave abierta, la lectura del instrumento es $i_A = i_0$. Esta corriente vale

$$i_0 = \frac{E}{R_L + r_A} \approx \frac{E}{R_L} \quad \text{si} \quad R_L \gg r_A \quad (1.3)$$

Supóngase ahora, siempre bajo la hipótesis $R_L \gg r_A$, que se cierra la llave y se varía r_P hasta lograr que la nueva lectura del instrumento, i'_A , sea la mitad de la anterior, esto es: $i'_A = i_0/2$. En estas condiciones, se tiene que por cada rama del paralelo circula la misma cantidad de corriente ($i_0/2$), de lo que se concluye inmediatamente que $r_A = r_P$. Esto constituye un método sencillo para medir r_A .

La validez del razonamiento anterior descansa fuertemente en la hipótesis $R_L \gg r_A$. Como consecuencia de la misma, fijado el valor de E , la corriente que entrega la pila, i_0 , depende prácticamente sólo de R_L , y por tanto, dicha corriente es independiente de que la llave esté abierta o cerrada.

Estrictamente hablando, la resistencia total del circuito conectado a la fuente de tensión disminuye al cerrar la llave (tanto más cuanto más pequeña sea r_P), por lo que la co-

riente que entrega la fuente aumenta. Si se desea remover la hipótesis $R_L \gg r_A$, puede demostrarse que resulta

$$r_A = r_P \frac{1}{1 - \frac{r_P}{R_L}} \quad (1.4)$$

donde r_P sigue denotando a la resistencia tal que, cuando se cierra la llave, la lectura del instrumento se reduce a la mitad.

1.4.2. Método 2

Si se dispone de un voltímetro, puede considerarse el circuito de la figura 1.6 en el que una fuente de tensión alimenta, a través de una resistencia limitadora adecuada, a un amperímetro de resistencia interna r_A . La lectura del voltímetro, V_V , es una medida de la caída de potencial en la resistencia incógnita, mientras que la lectura del amperímetro, i_A , indica la corriente que circula por ella. Variando la resistencia limitadora, con cuidado para no exceder la escala del amperímetro, se puede obtener un conjunto de datos $\{(i_{Ak}, V_{Vk})\}_{k=1}^N$ cuyo ajuste lineal permite determinar r_A .

1.5. Leyes de Kirchoff

El propósito principal de esta sección es familiarizarse con el uso de voltímetros y amperímetros, especialmente en lo referido a la estimación de sus incertezas de medición y al denominado error de inserción, que consiste en la modificación que inevitablemente se produce en el circuito bajo estudio cuando se le conecta (se le agrega) un instrumento real.

Ley de Mallas Se sugiere armar un circuito sencillo y, mediante un voltímetro, poder responder con propiedad si para ese circuito se verifica o no la Ley de Mallas. Para ello es esencial estimar correctamente los errores de lectura y de inserción.

Ley de Nodos Se sugiere proceder de manera análoga al caso anterior, pero midiendo corrientes de rama concurrentes a un nodo, empleando un amperímetro.

1.6. Teorema de Thevenin

Dado un circuito de cierta complejidad, compuesto por varias fuentes y resistencias, se busca verificar experimentalmente que se comporta como si estuviera compuesto por una

sola pila, de tensión E_{eq} , y una sola resistencia, de valor R_{eq} , conectada en serie con la pila.

Desde el punto de vista experimental, se sugiere armar un circuito de prueba, conectarle diferentes resistencias de carga de valor conocido R_L y medir la corriente i que por ella circule.

Si el modelo es correcto, graficando la caída de potencial sobre R_L en función de i resultará una recta de cuyos parámetros podrán obtenerse E_{eq} y R_{eq} .

1.7. Teorema de Norton

El Teorema de Norton es similar al de Thevenin, pero en el que el circuito equivalente esta compuesto por una fuente de corriente i_N conectada en paralelo con una resistencia R_N . Las mismas mediciones que permiten verificar el Teorema de Thevenin sirven para verificar el de Norton.

1.8. Principio de superposición

Conviene armar un circuito simple, compuesto por al menos 2 pilas, que permita verificar si el estado del circuito cuando todas las pilas estan conectadas, es la suma algebraica de los estados de los circuitos resultantes de reemplazar todas las pilas, salvo una, y de a una por vez, por sus resistencias internas.

Por estado de un circuito se entiende al conjunto de valores de caída de tensión sobre, o corriente circulante por, cada uno de sus elementos.

Al diseñar el circuito, tenga cuidado de no cortocircuitar ninguna pila.

1.9. Preguntas

1. a) Cuáles considera que son los motivos para modelar un voltímetro real mediante uno ideal al que se le coloca una resistencia en paralelo, mientras que para modelar un amperímetro real se recurre a uno ideal pero, en este caso, la resistencia que se agrega se conecta en serie? b) No podría ser al revés, por ejemplo?.
2. Realice un análisis crítico de las hipótesis involucradas en el método 1 para medir R_V .

3. Con referencia al método 2 para medir R_V , suponga que dispone de una fuente de tensión que a lo sumo puede entregar 30 V y que el voltímetro bajo estudio presenta una resistencia interna $R_V \sim 10 \text{ M}\Omega$. Qué características debe tener el amperímetro? Cree que uno de 3 $1/2$ dígitos cuya escala más sensible permita medir desde -200 mA a +200 mA le será útil?
4. Cree que hay alguna vinculación entre la ley de Ohm y el principio de superposición aplicado al caso de circuitos eléctricos?. De existir, cuál sería?.
5. Las pilas, satisfacen la ley de Ohm?. Y satisfacen el principio de superposición?
6. Los cables ideales (resistencia nula) satisfacen la ley de Ohm?. Y el principio de superposición?
7. Pueden existir elementos de circuito que satisfagan la ley de Ohm pero no el principio de superposición?. Y viceversa?

2016.v1

César Moreno, Departamento de Física-FCEyN-UBA e INFIP-CONICET.