

2 CONSTRUCCIÓ I CONNEXIÓ D'APARELLS DE MESURA

Resum. Estudiarem com estan constituïts i com s'han de connectar dos dels aparells de mesura més emprats en el laboratori d'electromagnetisme: el voltímetre i l'amperímetre. Primer construirem un voltímetre i un amperímetre a partir d'un aparell d'alta impedància amb escala única que anomenarem *voltímetre bàsic*.

Després aprendrem a mesurar simultàniament la intensitat que circula per un component elèctric i la tensió entre els seus extrems, amb aquests aparells. Cal conèixer quina magnitud física està afectada d'error, la importància de l'error i la manera de minimitzar-lo.

2.1 Fonament

2.1.1 Voltímetre

El voltímetre és un aparell que mesura la diferència de potencial entre dos punts qualssevol, A i B, i que es connecta directament entre aquests punts per tal de fer la mesura (Figura 1). Això vol dir que quedarà en paral·lel amb tot allò que estigui connectat entre A i B.

El voltímetre no ha de modificar els corrents i/o les tensions presents al circuit. Per això, i a fi que no es desviï part del corrent per la branca del voltímetre, aquest ha de tenir una impedància (resistència) molt alta.

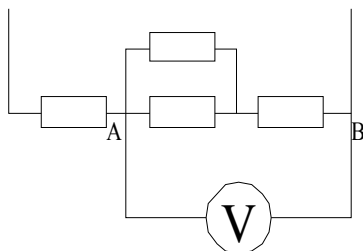


Figura 1. Connexió d'un voltímetre.

$$I_V = \frac{V_B - V_A}{R_V} \quad (1)$$
$$I_V \approx 0 \Rightarrow R_V \rightarrow \infty$$

2.1.2 Amperímetre

L'amperímetre és un aparell que mesura la intensitat del corrent que circula per una branca de circuit. Com es pot veure en la figura 2, aquest aparell es connecta en sèrie a la branca on es vol mesurar el corrent.

Per tal que no hi hagi una caiguda de tensió (ΔV_A) a l'amperímetre, i quedin per tant modificats els corrents i tensions del circuit, aquest ha de tenir una impedància (resistència) molt baixa.

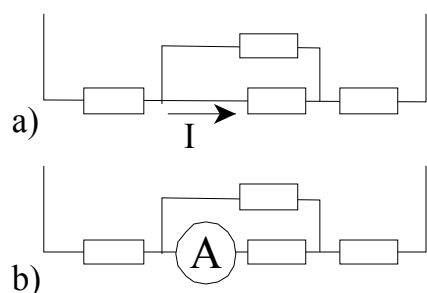


Figura 2. Connexió d'un amperímetre.
Per mesurar el corrent I cal obrir la
branca corresponent i intercalar-hi
l'amperímetre.

$$\begin{aligned} \Delta V_A &= I_A R_A \\ \Delta V_A &\approx 0 \Rightarrow R_A \approx 0 \end{aligned} \quad (2)$$

2.1.3 Construcció d'un amperímetre

Per a construir un amperímetre digital cal trobar la relació que hi ha entre la intensitat que volem mesurar i la tensió que mesura un voltímetre bàsic (veure apèndix A2.1). Per a fer això es munta una resistència de valor conegut, r , adequat en paral·lel amb el voltímetre bàsic (figura 3). La lectura d'aquest, en ser proporcional a la tensió, també ho és a la intensitat I en virtut de la llei d'Ohm. El valor de r ve determinat pel rang d'intensitat a mesurar, per la impedància d'entrada del voltímetre bàsic i per la presentació en pantalla. Un paràmetre important de "l'amperímetre" construït és la impedància d'entrada, que no és res més que la resistència òhmica entre els dos terminals de l'amperímetre, és a dir, l'associació en paral·lel de r i la impedància d'entrada del voltímetre bàsic R_V .

Com que habitualment r és molt menor que R_V , la impedància d'entrada és, en molt bona aproximació, r .

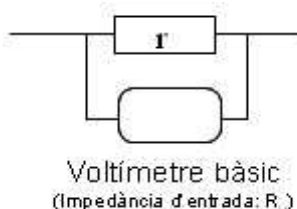


Figura 3. Esquema d'un amperímetre
construït a partir d'un voltímetre bàsic.

2.1.4 Construcció d'un voltímetre

Pot passar que el rang d'entrada del voltímetre bàsic sigui insuficient i no permeti mesurar valors de tensió elevats. Cal aleshores construir un divisor de tensió (figura 4): si volem mesurar la tensió entre els punts A i B, connectem entre ells dues resistències R_1 i R_2 en sèrie de manera que la tensió quedi dividida entre les dues, i que a R_2 la tensió estigui dins el rang del voltímetre bàsic (en el nostre cas, entre 0 i 1 V) i pugui ser mesurada. Aquesta condició ens dona una relació entre R_1 i R_2 . Tot i que en principi hauríem d'escollir entre les combinacions possibles les de valors molt elevats, ja que estem construint un voltímetre, estem limitats a l'hora d'escollir R_2 . Una R_2 massa elevada (superior a l'1 % de R_V) faria que pel voltímetre bàsic es desviés una part important del corrent, cosa que provocaria un comportament no previst del voltímetre construït.

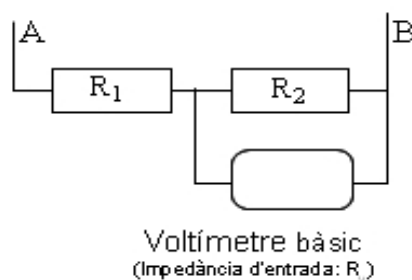


Figura 4. Esquema d'un voltímetre construït a partir d'un voltímetre bàsic. El divisor de tensió permet d'incrementar el rang de mesura.

La impedància del voltímetre construït serà la resultant de l'associació en sèrie de R_1 amb el paral·lel de R_2 i R_V (figura 4).

Com que hem escollit R_2 , com a mínim, dos ordres de magnitud menor que R_V , la impedància del paral·lel serà pràcticament R_2 i, per tant, la del voltímetre construït serà $R_1 + R_2$.

2.1.5 Connexió d'aparells de mesura

Quan volem mesurar simultàniament la tensió i la intensitat en un component elèctric, per exemple una resistència, tenim dues opcions possibles que es presenten a la figura 5. Ambdues configuracions són equivalents en el cas ideal en què suposem que el voltímetre té resistència d'entrada infinita, i l'amperímetre resistència d'entrada zero.

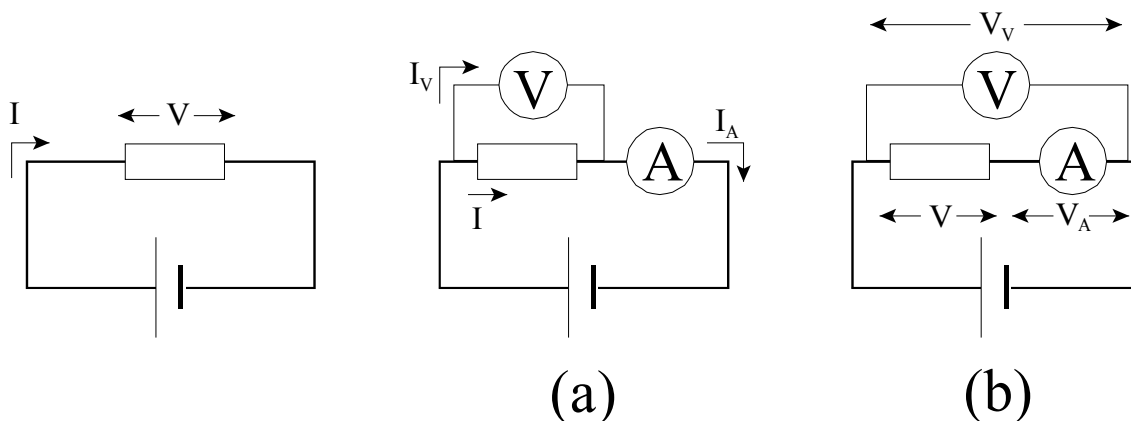


Figura 5. Connexió de voltímetre i amperímetre. Muntatge per a (a) resistències moderades, (b) resistències altes.

En el cas real on el voltímetre té una impedància d'entrada finita i l'amperímetre una impedància d'entrada diferent de zero, les mesures són diferents pels dos circuits doncs el voltímetre desviarà un corrent I_V per la seva branca i l'amperímetre introduirà una caiguda de potencial V_A .

➤ *Muntatge (a)*: (Mesura correcta de la tensió, V ; error en la mesura de la intensitat, I)

Si per determinar $R = V/I$ connectem el voltímetre i l'amperímetre tal com mostra la figura 5a, obtenim una lectura correcta de la tensió, ja que el voltímetre i l'element que estudiem suporten una diferència de potencial idèntica, V , mentre que cometem un error en la mesura de la intensitat, ja que

mesurem I_A mentre que la intensitat que efectivament circula per l'element és I . La relació entre elles és:

$$I_A = I + I_V \quad (3)$$

El valor de la resistència en qüestió compleix que:

$$\frac{1}{R_{mesura}} = \frac{I_A}{V} = \frac{I + I_V}{V} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_V} \quad (4)$$

On R_V és la resistència del voltímetre, normalment elevada. S'obté una bona mesura ($R \approx R_{mesura}$) si la resistència que es mesura és molt inferior a la del voltímetre ($R_V \gg R$). Aquesta és la condició que ha de complir R per tal que utilitzant aquest esquema no cometem un error important.

➤ *Muntatge (b)*: (Mesura correcta de la intensitat, I ; error en la mesura de la tensió, V .)

Si per determinar $R = V/I$ connectem el voltímetre i l'amperímetre tal com mostra la figura 5b, obtenim una lectura correcta d'intensitat, ja que l'amperímetre i l'element en estudi formen part de la mateixa branca i estan recorreguts pel mateix corrent, I , mentre que cometem un error en la mesura de la tensió, ja que:

$$V_V = V + V_A \quad (5)$$

El valor de la resistència que se'n dedueix és:

$$R_{mesura} = \frac{V_V}{I} = \frac{V + V_A}{I} = R + R_A \quad (6)$$

L'error comès és petit i, per tant $R \approx R_{mesura}$ quan $R_A \ll R$. Aquesta és la condició que ha de complir R per tal que, utilitzant aquest esquema, no cometem un error important. Pel mateix motiu, aquest esquema és el que convé per a la mesura correcta de resistències "grans".

2.2 Dispositiu experimental

- Voltímetre bàsic DITEL de característiques instrumentals:
 - rang d'entrada de 0 a 1 V,
 - rang de presentació en pantalla de 0000 a 1999 (3½ dígits),
 - resolució de 0.5 mV,
 - impedància d'entrada d'aproximadament 10 MΩ.
- 2 multímetres.
- Font d'alimentació DC.
- Capsa de resistències de dècades: 10 Ω a 1 MΩ.
- Resistències per a totes les dècades des d'1 Ω fins a 10 MΩ.

2.3 Procediment experimental

El primer objectiu és la construcció d'un amperímetre digital amb un rang de ± 20 mA i d'un voltímetre digital amb un rang de ± 20 V. Ho farem amb el voltímetre bàsic i un joc de resistències. Per tal d'optimitzar el temps al laboratori, és molt important portar els càlculs dels apartats 2.3.1, 2.3.2 i 2.3.3 fets abans de començar la sessió pràctica.

El segon objectiu és posar de manifest els efectes sobre la mesura d'una resistència utilitzant els dos circuits de mesura de la figura 5. Ho farem mesurant el valor d'un conjunt de resistències entre 1Ω i $1 \text{ M}\Omega$, amb ambdós circuits de mesura i comparant les mesures obtingudes amb el seu valor nominal.

2.3.1 Construcció d'un amperímetre amb rang ± 20 mA

Per tal de fer un amperímetre que permeti mesurar intensitats en el rang de ± 20 mA haurem d'utilitzar l'esquema de la figura 3. Calculeu la resistència d'entrada r necessària per tal que el fons d'escala sigui 20 mA; és a dir, quan per r circulin 20 mA, la diferència de potencial que mesura el voltímetre bàsic hauria de ser 1 V per tal que aquest valor sigui el fons d'escala de l'aparell.

Feu l'esquema d'un circuit format per una font de tensió i una resistència de 1000Ω , en el que es mesura la intensitat que circula per la resistència amb l'amperímetre construït i un amperímetre patró simultàniament. Consulteu amb el professor el circuit que heu dissenyat i munteu-lo.

Escolliu 9 valors uniformement distribuïts per al rang de l'aparell construït ($-20 \rightarrow 20$ mA) i amb els valors de les lectures dels 2 amperímetres obtingueu la taula de calibratge. Representeu gràficament la recta de calibratge.

2.3.2 Construcció d'un voltímetre amb rang ± 20 V

Per a construir un voltímetre que mesuri tensions en el rang de ± 20 V utilitzarem l'esquema de la figura 4. Tenint presents les consideracions sobre R_1 i R_2 fetes a 2.1.4, calculeu els valors de R_1 i R_2 per tal que el fons d'escala sigui 20 V. Tingueu en compte que R_2 ha de tenir un valor del 1% de la impedància d'entrada del voltímetre bàsic, i que quan al voltímetre construït hi apliquem 20 V, a R_2 hi hauria d'haver una diferència de potencial d'1 V per tal que el voltímetre bàsic estigui a fons d'escala.

Feu l'esquema d'un circuit en el que mesureu simultàniament la diferència de potencial a la sortida d'una font de tensió amb el voltímetre construït i un voltímetre patró. Consulteu amb el professor el circuit que heu dissenyat i munteu-lo.

Escolliu 9 valors uniformement distribuïts per al rang de l'aparell construït ($-20 \rightarrow 20$ V) i amb els valors de les lectures dels 2 voltímetres obtingueu la taula de calibratge. Representeu gràficament la recta de calibratge.

2.3.3 Mesura de la resistència

Comenceu muntant el circuit (a) de la figura 5. Mentre realitzeu el muntatge cal tenir la precaució que la font de tensió tingui seleccionada una tensió zero. Després de connectar cada resistència, incrementeu gradualment la tensió fins al valor que us sembli raonable per mesurar tant V com I , tenint present que per a resistències petites, una tensió elevada farà passar una intensitat molt elevada que escalfarà massa la resistència. Per evitar-ho, la **potència dissipada** a la resistència durant la mesura ($I^2 R$) **no pot superar els 50 mW**. Calculeu la màxima intensitat permesa per a

resistències d' 1Ω , 10Ω i 100Ω .

Amb els valors mesurats aneu construint la taula del full de mesures, on consten la R nominal de la resistència, la tensió i la intensitat. Tingueu cura d'utilitzar el major número possible de xifres significatives i d'indicar clarament les unitats utilitzades. Calculeu la resistència mesurada a partir dels valors mesurats de la tensió i de la intensitat.

Feu el mateix utilitzant el circuit (b) de la figura 5, tenint en compte que **la potència dissipada a la resistència durant la mesura (I^2R) no superi els 50 mW**.

Calculeu la columna de la taula corresponent a l'error relatiu sobre el valor nominal de la resistència comès en el procés de mesura.

Representeu una gràfica amb els valors nominals de les resistències en l'eix de les X , i els valors calculats de cada un dels mètodes en l'eix de les Y .

2.4 Realització de l'informe

Empleneu el full de laboratori i contesteu en un full apart les següents qüestions:

1. Calculeu la impedància d'entrada de l'amperímetre construït.
2. Calculeu la impedància d'entrada del voltímetre construït.
3. Si en el voltímetre construït substituïm la resistència R_2 per una altra de valor $R_2/2$, adaptant el valor de R_1 en aquesta nova situació per tal que la relació entre elles es mantingui constant, quin és el rang del nou aparell? I la resolució? Comenteu en quins aspectes aquest nou voltímetre és millor o pitjor que l'anterior.
4. En quines regions s'aparten de la linealitat les gràfiques de l'apartat 2.3.3? Per què?
5. Quan estem mesurant la resistència d' 1Ω amb el circuit (a), un canvi en l'escala de l'amperímetre provoca un canvi en la tensió mesurada pel voltímetre.
 - (a) La tensió que marca el voltímetre és la que hi ha realment en els extrems de la resistència?
 - (b) Quin efecte té el canvi d'escala de l'amperímetre que faci canviar el valor mesurat pel voltímetre?
 - (c) És correcte el valor de la resistència calculat a partir dels valors mesurats de la tensió i de la intensitat?
6. Si fem servir el circuit (b) per a mesurar una resistència de valor similar al de la resistència interna del voltímetre:
 - (a) Com és la intensitat que circula pel voltímetre respecte la que circula per la resistència?
 - (b) En aquestes circumstàncies, és correcta la mesura de la tensió que ens proporciona el voltímetre?
 - (c) Com és la intensitat que circula per la resistència respecte la intensitat que circula per l'amperímetre? En aquest cas, és correcta la mesura de la intensitat que proporciona l'amperímetre?

APÈNDIX

A2.1 Estructura d'un aparell de mesura digital

Els aparells de mesura digitals es basen en un convertidor analògic-digital, que a una tensió contínua fa correspondre un nombre que apareix en una pantalla. Constitueix el que s'anomena *voltímetre bàsic*.

El convertidor es comporta linealment, o sigui, el nombre que apareix en pantalla és proporcional a la tensió mesurada. La funció del voltímetre bàsic està limitada a un cert rang de la tensió d'entrada (fora d'aquest rang la tensió no és mesurable). Igualment, el nombre que apareix en pantalla també està comprès en un cert marge (donat pel seu nombre de dígit).

El voltímetre bàsic pot utilitzar-se per a múltiples mesures: intensitat, temperatura, pressió, tensió de valors fora del rang d'entrada, etc. Per això a cada aplicació caldrà transformar el senyal que s'ha de mesurar en una tensió dins el rang d'entrada (figura A1). Això s'anomena *condicionament del senyal*.

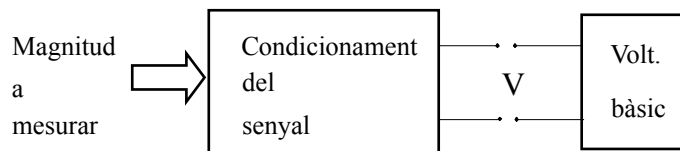


Figura A1. Mesures amb un voltímetre digital

A2.2 Característiques d'un aparell de mesura

- **Rang de presentació en pantalla:** interval dels valors numèrics que presenta en pantalla.
- **Rang de l'aparell:** interval dels valors de la magnitud que mesura l'aparell.
- **Resolució:** variació més petita en la magnitud que l'aparell pot detectar (últim dígit).
- **Precisió:** fa referència a la dispersió en les mesures. Indica fins a quin punt l'aparell està lliure d'errors aleatoris. Es calcula com:

$$\text{Precisió} = 1 - \Delta x / x_m \quad (7)$$

on Δx és la desviació observada en les mesures successives i x_m és el valor mig mesurat. Exemple: si observem que en una mesura de 2 V la lectura oscil·la en 0.6 mV llavors la precisió és $(1 - 0.0006\text{V}/2\text{V}) = 99.97\%$.

- **Exactitud:** error absolut de l'aparell. Quantifica com de prop es troba la lectura de l'instrument del valor proporcionat per un patró. L'exactitud generalment s'indica en %:

$$\text{Exactitud} = 100 \times \frac{\text{lectura instrument} - \text{lectura patró}}{\text{lectura patró}} \quad (8)$$

- **Impedància d'entrada:** d'importància vital en aquests aparells. Per tal de no pertorbar la magnitud que es mesura, en un amperímetre ha de ser baixa, i en un voltímetre, elevada.