

TRADUCCIONS DELS EXEMPLES DE L'EA-04/02 (EXEMPLE S9)

José Sánchez González

Vocal de la Secció Catalana de Metrologia

En el BUTLLETÍ anirem traduïnt, en diverses entregues, els diferents exemples de l'EA-4/02 M: 2022 de l'avaluació de la incertesa de mesura en el calibratge. La versió oficial d'aquest document, però, és l'anglesa, que es pot consultar en aquest [enllaç](#) de la European co-operation for Accreditation (EA).

El segon exemple traduït en el BUTLLETÍ correspon al calibratge d'un multímetre digital de mà a 100 V en continu, que correspon a l'apartat S9.

S9. CALIBRATGE D'UN MULTÍMETRE DIGITAL DE MÀ A 100 V DC

S9.1 Com a part d'un calibratge general, un multímetre digital de mà (DMM) es calibra a una entrada de 100 V DC utilitzant un calibrador multifunció com a patró de treball. S'usa el procediment de mesura següent:

1. Els borns de sortida del calibrador estan connectats als borns d'entrada del DMM mitjançant cables de mesura adequats.
2. El calibrador es col·loca a la seva configuració de 100 V i, després d'un període d'estabilització adequat, s'anota la lectura DMM.
3. L'error d'indicació del DMM es calcula utilitzant les lectures DMM i la configuració del calibrador.

S9.2 Cal tenir en compte que l'error d'indicació del DMM que s'obté mitjançant aquest procediment de mesura inclou tant l'efecte de la compensació com les desviacions de linealitat.

S9.3 L'error d'indicació E_X del DMM a calibrar s'obté de

$$E_X = V_{iX} - V_S + \delta V_{iX} - \delta V_S \quad (\text{S9.1})$$

on

V_{iX} és la tensió indicada pel DMM (índex i significa indicació),

V_S és la tensió generada pel calibrador,

δV_{iX} és la correcció de la tensió indicada a causa de la resolució finita del DMM,

δV_S és la correcció de la tensió del calibrador a causa de

1. la deriva des del seu últim calibratge,

2. les desviacions resultants de l'efecte combinat de la compensació, la no linealitat i les diferències de guany,
3. les desviacions en la temperatura ambient,
4. les desviacions en la potència de la xarxa i
5. els efectes de càrrega resultants de la resistència finita d'entrada del DMM a calibrar.

S9.4 A causa de la resolució limitada de la indicació del DMM, no s'observa cap dispersió en els valors indicats.

S9.5 Lectures DMM (V_{iX})

El DMM indica la tensió 100,1 V a la configuració del calibrador 100 V. Se suposa que la lectura del DMM és exacta (vegeu S9.4).

S9.6 Patró de treball (V_S)

El certificat de calibratge per al calibrador multifunció estableix que el voltatge generat és el valor indicat per la configuració del calibrador i que la incertesa relativa expandida associada de mesura és $W = 0,000\ 02$ (factor de cobertura $k = 2$), resultant en una incertesa expandida de mesura associada amb la configuració de 100 V de $U = 0,002\ \text{V}$ (factor de cobertura $k = 2$).

S9.7 Resolució de DMM a calibrar (δV_{iX})

El dígit menys significatiu de la pantalla DMM correspon a 0,1 V. Cada lectura DMM té una correcció deguda a la resolució finita de la pantalla que s'estima en 0,0 V amb límits de $\pm 0,05\ \text{V}$ (és a dir, la meitat de la magnitud del dígit menys significatiu).

S9.8 Altres correccions (δV_S)

Atès que no es disposa de xifres individuals, la incertesa de mesura associada a les diferents fonts es deriva de

l'especificació de precisió donada pel fabricant del calibrador. Aquestes especificacions estableixen que el voltatge generat pel calibrador coincideix amb la configuració del calibrador dins de $\pm (0,0001 \times V_S + 1 \text{ mV})^1$ en les condicions de mesura:

1. La temperatura ambient es troba dins del rang de 18 °C a 23 °C.
2. La tensió de xarxa que alimenta el calibrador es troba en el rang de 210 V a 250 V.
3. La càrrega resistiva en els terminals del calibrador és superior a 100 kΩ.
4. El calibrador s'ha calibrat en l'últim any.

Atès que es compleixen aquestes condicions de mesura i l'historial de calibratge del calibrador mostra que es pot confiar en l'especificació del fabricant, se suposa que la correcció que s'aplicarà al voltatge generat pel calibrador és de 0,0 V dins de $\pm 0,011 \text{ V}$.

S9.9 Correlació

Cap de les quantitats d'entrada es considera correlacionada en una mesura significativa.

S9.10 Balanç d'incertesa (E_X)

A tall d'exemple es mostra la taula 1, on es detalla el balanç d'incertesa amb unes dades orientatives tal com es mostra en el [document](#).

TAULA 1: Taula amb el balanç d'incertesa, on es detallen uns valors orientatius, típics del calibratge d'un multímetre de mà per la tensió de 100 V.

Magnitud	Estimat	Incertesa típica $u(x_i)$	Distribució de probabilitat	Coefficient de sensibilitat c_i	Contribució a la incertesa $u_i(y)$
X_i	x_i				
V_{ix}	100,1 V	—	—		—
V_S	100,0 V	0,001 V	normal	-1,0	-0,001 V
δV_{ix}	0,0 V	0,029 V	rectangular	1,0	0,029 V
δV_S	0,0 V	0,0064 V	rectangular	-1,0	-0,0064 V
E_X	0,1 V				0,030 V

S9.11 Incertesa eixamplada

La incertesa típica de mesura associada al resultat està clarament dominada per l'efecte de la resolució finita del DMM. La distribució final no és normal sinó essencialment

1. Un mètode àmpliament utilitzat per a presentar l'especificació de precisió dels instruments de mesura en fulls de dades o manuals consisteix a donar els límits d'especificació en termes de «configuració». Per al calibrador, l'enunciat seria $\pm (0,01 \%$ de configuració + 1 mV). Encara que es consideri que aquest mètode és equivalent a l'expressió anterior, no s'utilitza aquí perquè pot induir a error en molts casos i perquè no representa una equació de magnituds físiques en la nomenclatura simbòlica acceptada internacionalment.

rectangular. Per tant, no és aplicable el mètode de graus efectius de llibertat descrit a l'annex E de l'EA-4/02. El factor de cobertura apropiat per a una distribució rectangular es calcula a partir de la relació donada en eq. (S9.8) en la nota matemàtica S9.14.

$$U = k \cdot u(E_X) = 1,65 \times 0,030 \text{ V} \cong 0,05 \text{ V}$$

S9.12 Resultat reportat

L'error mesurat d'indicació del voltímetre digital de mà a 100 V és $(0,10 \pm 0,05) \text{ V}$.

La incertesa eixamplada de mesura reportada és la incertesa típica de mesura multiplicada pel factor de cobertura $k = 1,65$ que s'ha derivat de la distribució de probabilitat rectangular assumida per a una probabilitat de cobertura del 95 %.

S9.13 Comentari addicional

El mètode utilitzat per a calcular el factor de cobertura està clarament relacionat amb el fet que la incertesa de mesura associada al resultat està dominada per l'efecte de la resolució finita del DMM. Això serà cert per al calibratge de tots els instruments d'indicació de baixa resolució, sempre que la resolució finita sigui l'única font dominant en el balanç d'incertesa.

S9.14 Nota matemàtica

Si la situació de mesura és tal que una de les aportacions d'incertesa del pressupost es pot identificar com un terme dominant, per exemple el terme amb índex 1, la incertesa estàndard que s'ha d'associar al resultat de la mesura y es pot escriure com

$$u(y) = \sqrt{u_1^2(y) + u_R^2(y)} \quad (\text{S9.2})$$

on

$$u_R(y) = \sqrt{\sum_{i=2}^N u_i^2(y)} \quad (\text{S9.3})$$

denota la contribució a la incertesa total dels termes no dominants. Sempre que la relació entre la contribució de la incertesa total $u_R(y)$ dels termes no dominants a la contribució a la incertesa $u_1(y)$ del terme dominant no sigui superior a 0,3, eq. (S9.2) es pot aproximar per

$$u(y) \cong u_1(y) \cdot \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{u_R(y)}{u_1(y)} \right)^2 \right] \quad (\text{S9.4})$$

L'error relatiu d'aproximació és menor que 1×10^{-3} . La variació relativa màxima de la incertesa típica resultant del factor entre parèntesis en eq. (S9.4) no és superior al 5 %. Aquest valor està dins de la tolerància acceptada per a l'arrodoniment matemàtic dels valors d'incertesa.

Sota aquests supòsits, la distribució de valors que raonablement es podria atribuir a la mesura és essencialment

idèntica a la distribució resultant de la contribució dominant coneguda. A partir d'aquesta densitat de distribució $\varphi(y)$ la probabilitat de cobertura p es pot determinar per a qualsevol valor de la incertesa de mesura expandida U per la relació integral

$$p(U) = \int_{y-U}^{y+U} \varphi(y') dy'. \quad (S9.5)$$

Invertint aquesta relació per a una probabilitat de cobertura donada, s'obté la relació entre la incertesa de mesura ampliada i la probabilitat de cobertura $U = U(p)$ per a la densitat de distribució donada $\varphi(y)$. Utilitzant aquesta relació, el factor de cobertura es pot expressar finalment com

$$k(p) = \frac{U(p)}{U(y)}. \quad (S9.6)$$

En el cas del voltímetre digital de mà, la contribució d'incertesa dominant resultant de la resolució finita de la indicació és $u_{\delta V_X}(E_X) = 0,029 \text{ V}$, mentre la contribució a

la incertesa total dels termes no dominants és $u_R(E_X) = 0,065 \text{ V}$. La relació rellevant és $u_R(E_X)/u_{\delta V_X}(E_X) = 0,22$. Així, la distribució resultant de valors que raonablement es poden atribuir com a errors d'indicacions és essencialment rectangular. La probabilitat de cobertura d'una distribució rectangular està linealment relacionada amb la incertesa de mesura expandida (sent a la semiamplada de la distribució rectangular)

$$p = \frac{U}{a}. \quad (S9.7)$$

Resolent aquesta relació per a la incertesa expandida de mesura U i inserint el resultat juntament amb l'expressió de la incertesa típica de mesura relacionada amb una distribució rectangular donada per eq. (3.8) d'EA-4/02 finalment s'obté la relació

$$k(p) = p\sqrt{3} \quad (S9.8)$$

Per a una probabilitat de cobertura $p = 95 \%$ aplicable a l'EA, el factor de cobertura rellevant és, per tant, $k = 1,65$.