

VALUTAZIONE DEL PESO DELL'INCERTEZZA DI TARATURA DI UNO STRUMENTO PER MISURAZIONE

In un processo di misura, particolare attenzione deve essere posta nella corretta valutazione dell'incertezza propagata dallo strumento di misura utilizzato, sul risultato della misura stessa.

Di norma, per uno strumento di misura a lettura diretta della grandezza misurata, i contributi d'incertezza che si riflettono sul risultato di una misurazione, sono:

- a) L'incertezza di taratura (**Ic**), documentata nel certificato di taratura.
- b) Lo scarto massimo di misura (**Em**), rispetto ai valori forniti dal sistema di riferimento, ricavabile dai risultati di taratura riportati nel certificato di taratura.
- c) La risoluzione di misura dello strumento (**Er**), ricavabile dalle specifiche dello strumento stesso.

Tenendo conto della probabilità di distribuzione più appropriata, per ognuno dei contributi all'incertezza sopra elencati devono ricavati i rispettivi scarti tipo, i quali, sommati in quadratura sotto radice, consentono di calcolare l'incertezza tipo composta u_c di un generico strumento di misura.

Moltiplicando l'incertezza tipo composta u_c per un opportuno coefficiente di copertura k , si ottiene l'incertezza estesa U che caratterizza le misure eseguite con un determinato strumento di misura.

Il procedimento per il calcolo dell'incertezza di misura descritto, è rappresentato dalla seguente formula

$$U = 2 \times \sqrt{\left(\frac{Ic}{2}\right)^2 + \left(\frac{Em}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{Er}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad [1]$$

Quando tutti i contributi d'incertezza sono correttamente stimati, ponendo il coefficiente $k=2$, per il calcolo dell'incertezza estesa, significa esprimere l'incertezza di misura con un livello di confidenza del 95%.

Il procedimento sopra descritto rappresenta un metodo semplice e sintetico ed in molti casi, sufficiente a stabilire se un determinato strumento di misura, possiede le caratteristiche metrologiche atte a soddisfare i requisiti necessari all'impiego cui è destinato.

Non sempre però tale metodo è sufficiente a calcolare l'incertezza d'uso di uno strumento di misura, in particolare, quando uno strumento deve essere utilizzato come campione di riferimento in un procedimento di taratura, dove occorre trasferire la riferibilità ad uno strumento di misura o ad un sistema di misura gerarchicamente inferiore.

In questi casi occorre compiere indagini più approfondite per individuare tutte le possibili sorgenti d'incertezza e tutte le grandezze influenti e, per ognuna di esse, stimarne i rispettivi contributi.

Fra le sorgenti d'incertezza che influenzano i risultati di una misurazione, intrinseche ad un generico strumento di misura, oltre alle componenti elencate ai punti a, b, c, devono essere certamente considerate:

- d) La deriva nel tempo dello strumento di misura (δ_{drift})
- e) Gli effetti delle condizioni ambientali (δ_{amb})
- f) Gli effetti dovuti alle differenti condizioni di taratura e di utilizzo (δ_{uso})
- g) La ripetibilità delle misure fornite dallo strumento di misura (δ_{rip})

Nei processi di misura o di taratura, di norma, sono presenti altri strumenti o dispositivi ausiliari che a loro volta possono influenzare il risultato delle misurazioni.

Molto spesso i contributi d'incertezza, introdotti nei procedimenti di misura o di taratura, dai dispositivi ausiliari, assumono un peso preponderante nella composizione dell'incertezza di misura finale.

Per cui, conoscere e stimare correttamente i diversi contributi d'incertezza, introdotti nella catena metrologica dai dispositivi ausiliari, diventa un'esigenza estremamente importante al fine di non sottostimare l'incertezza di misura in un processo di misura o di taratura, con conseguenti rischi per la qualità finale di un determinato processo o prodotto, ovvero, non incorrere in un'inaccettabile sovrastima dell'incertezza, con negative ripercussioni in termini di costi.

STIMARE CORRETTAMENTE L'INCERTEZZA DI MISURA E' UNA ESIGENZA DI PRIMARIA IMPORTANZA PER CHI E' COINVOLTO IN ATTIVITA' METROLOGICHE!!

Esaminiamo un caso pratico.

Valutiamo l'incertezza di taratura di una procedura di taratura di termocoppie per convalida dei processi di sterilizzazione.

Gli strumenti utilizzati nel procedimento di taratura sono:

1. Termometro campione di riferimento: **IRTD-400 M2801 S/N B0627**
2. Data logger: **DIGISTRIP 4S+ S/N 9811008**
3. Fornetto calibratore a secco: **HTR 400**

1. Individuiamo le componenti d'incertezza associate ai singoli elementi della catena metrologica.

1.1 Per il termometro campione di riferimento ricerchiamo nei certificati di taratura, i dati necessari alla stima dei contributi d'incertezza:

Osserviamo i risultati di taratura riportati a pag. 3 del certificato n° 933 in data 17-09-2001 del Centro di taratura DKD 25901 istituito da KAYE Instruments GMBH:

5.2.2 Messergebnisse nach der Justierung				
(Measurements after Reprogramming)				
TEMPERATURE	REFERENCE	IRTD	DIFFERENCE	MEASUREMENT
SOURCE	TEMPERATURE	TEMPERATURE	TEMPERATURE	UNCERTAINTY
DEVICE	DEG. C	DEG. C	DEG. C	DEG. C
=====	=====	=====	=====	=====
Nitrogen	-196,008	-196,006	0,002	0,010
Glycol	-59,994	-59,967	0,027	0,008
Ice (1)	0,012	0,010	-0,002	0,005
Oil Bath	99,994	99,993	-0,001	0,007
Lo Salt	259,996	259,985	-0,011	0,009
Hi Salt	419,596	419,599	0,003	0,012
ICE (2)	0,012	0,012	0,000	0,005

Prospetto: A

Interpretiamo i dati:

- I dati evidenziati nell'area 1 sono le differenze fra i valori di temperatura letti dalla IRTD e i valori di temperatura misurati dal termometro campione di riferimento (Reference temperature).
- I dati evidenziati nell'area 2 sono le incertezze di misura del sistema di riferimento.

Mentre, sempre sullo stesso certificato di taratura, a pag. 4 troviamo l'incertezza totale di taratura:
 “

Because of the done calibration and former test to IRTDs you can expected a maximun uncertainty over the full range (-196°C to 420°C) of not more than 35 mK.

The uncertainty of measurement corresponding to the measurement results is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor k=2. The standard deviation was calculated in accordance with DKD-3 and considers the uncertainties of the used standard, the calibration method, the environmental conditions as well as short-time instabilities of the calibrated IRTD. The true value is located in the corresponding interval with a probability of 95%.

....”

1.2 Ora ricerchiamo nel certificato di taratura SIT n° 240-T/02, riferito allo stesso termometro campione di riferimento IRTD, emesso in data 2002-09-27 dal Centro di taratura SIT 128 istituito da FASINTERNATIONAL S.r.l. – Milano, ulteriori dati per poter completare l'analisi delle componenti d'incertezza.

Osserviamo i risultati della taratura “AS FOUND” riportati a pag. 3 del certificato n° 240-T/02:

“Prospetto: B

RISULTATI DELLA TARATURA AS FOUND AS FOUND CALIBRATION REPORT <i>(Measurement before reprogramming)</i>				
Bagno di taratura	Temperatura di riferimento [°C]	IRTD Valore indicato [°C]	Differenza Val. indicato – val. rif. [°C]	
Alcool	-60.082	-60.072	0.010	
Ghiaccio / Ice	0.000	-0.018	-0.018	
Olio / Oil	99.902	99.861	-0.041	
Olio / Oil	260.135	260.067	-0.068	
Sali fusi / Salt	419.926	419.881	-0.045	
Temperature Source device	Reference Temperature [°C]	IRTD Temperature [°C]	Difference IRTD temp – Ref. Temp. [°C]	

..»

Interpretiamo i dati contenuti nel prospetto B:

- I dati evidenziati nell'area 3 ci mostrano i risultati di misura forniti dall'IRTD così come è stata trovata dopo un anno dalla precedente taratura, questo dato ci consente di determinare il contributo d'incertezza dovuto alla deriva nel tempo.

Proseguendo nella consultazione dello stesso certificato di taratura a pag. 4 troviamo i risultati di taratura finali con le rispettive incertezze:

Prospetto: C

RISULTATI DELLA TARATURA CALIBRATION REPORT <i>(Measurement after reprogramming)</i>				
Bagno di taratura	Temperatura di riferimento [°C]	IRTD Valore indicato [°C]	Differenza Val. indicato – val. rif. [°C]	Incetezza di misura [°C]

Alcool	-79.033	-79.033	0.000	0.100
Alcool	-40.098	-40.102	-0.004	0.100
Ghiaccio / Ice	0.000	0.006	0.006	0.050
Olio / Oil	99.952	99.970	0.018	0.050
Olio / Oil	260.199	260.207	0.008	0.100
Sali fusi / Salt	419.992	419.959	-0.033	0.100
Ghiaccio / Ice	0.000	0.008	0.008	0.050
Temperature Source device	Reference Temperature [°C]	IRTD Temperature [°C]	Difference IRTD temp – Ref. Temp. [°C]	Measurement uncertainty [°C]

Interpretiamo i dati esposti nel prospetto C:

- I dati evidenziati nell'area 4 ci mostrano le deviazioni delle misure fornite dall'IRTD rispetto alla temperatura di riferimento. In altri termini, questi valori, possono essere definiti l'errore di misura della IRTD.
- I dati contenuti nell'area 5 sono le incertezze estese del procedimento di taratura, espresse con coefficiente di copertura $k = 2$.

A questo punto abbiamo individuato tutti i dati necessari, per la stima dei contributi d'incertezza associati al termometro campione di riferimento **IRTD-400 M2801 S/N B0627**.

Procediamo ora alla stima dei singoli contributi d'incertezza associati alla IRTD:

Come primo passo definiamo il campo di temperatura entro il quale il termometro deve essere effettivamente utilizzato come campione di riferimento, nei procedimenti di taratura di sonde per processi di sterilizzazione.

Nel caso in esame il campo d'impiego previsto è da **0°C a 260°C**.

- a) In questo intervallo l'incertezza di taratura (**Ic**) di ampiezza maggiore, è di **0.10°C**
- b) Nello stesso intervallo lo scarto (errore) massimo di misura (**Em**) risulta di **0.018°C**
- c) Mentre la risoluzione (**Er**) è di **0.001°C**

Proseguiamo con l'analisi dei dati per la stima degli ulteriori contributi d'incertezza.

- d) La deriva nel tempo (**δ_{drift}**) la possiamo stimare confrontando i risultati di taratura contenuti nel **prospetto: B** ed evidenziati con il n. 3, con i dati contenuti nel **prospetto: A** ed evidenziati con il n. 1.

Nel caso in esame il valore massimo di (**δ_{drift}**) è dato da: **$|(-0.068)-(-0.011)| °C = 0.057°C$** .

- e) Gli effetti dovuti alle condizioni ambientali (**δ_{amb}**), posto che il termometro campione IRTD venga utilizzato in ambiente a temperatura controllata, il contributo (**δ_{amb}**) viene stimato di entità trascurabile.
- f) Gli effetti dovuti alle differenti condizioni di taratura e di utilizzo (**δ_{uso}**) possono influenzare le misure, in quanto la taratura viene eseguita con mezzi e con immersione diverse dalle condizioni d'uso. Il contributo (**δ_{uso}**) è stimato di ampiezza non superiore a **0.02°C**
- g) La ripetibilità (**dispersione dei valori**) delle misure fornite dalla IRTD nel breve termine (**δ_{rip}**) è stimata pari a **0.002°C**

Completata l'analisi dei dati, e stimati tutti i contributi d'incertezza associati alla IRTD, si può procedere al calcolo dell'incertezza tipo composta (**u_c**), sommando in quadratura sotto radice quadrata gli scarti tipo dei contributi d'incertezza elencati da a) a g), otteniamo:

$$u_{c(IRT D)} = \sqrt{\left(\frac{0.10}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.018}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.001}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.057}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.000}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.02}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.002}{2}\right)^2} = 0.062^{\circ}\text{C} [2]$$

Lo scarto tipo dell'incertezza associata alla IRTD verrà successivamente combinato con gli scarti tipo degli altri strumenti che compongono la catena metrologica del procedimento di taratura trattato.

Proseguiamo con l'analisi e la stima delle componenti d'incertezza associate all'acquisitore dati DIGISTRIP 4S+ S/N 9811008

1.3 Per l'acquisitore dati ricerchiamo nei certificati di taratura, i dati necessari alla stima dei contributi d'incertezza:

Osserviamo i risultati di taratura riportati a pag. 6 del certificato SIT n° E-006/03 in data 2003-01-20 del Centro di taratura 128 istituito da FASINTERNATIONAL S.r.l. – Milano, riferito al data logger **DIGISTRIP 4S+ S/N 9811008**.

Prospetto: D

RISULTATI DI TARATURA FINALI				
Valori di riferimento		Strumento in taratura		
Valore applicato	Temperatura corrispondente	Valore letto	Deviazione	Incertezza di misura
<i>Applied value</i>	<i>Relevant temperature</i>	<i>Instrument reading</i>	<i>Deviation</i>	<i>Measurement uncertainty</i>
VI*	TI	TL	TL-TI	
-2.788mV	-80.0°C	-80.0°C	0.0°C	0.20°C
-1.475mV	-40.0°C	-40.0°C	0.0°C	0.19°C
0.000mV	0.0°C	0.0°C	0.0°C	0.06°C
2.036mV	50.0°C	50.0°C	0.0°C	0.17°C
4.279mV	100.0°C	100.1°C	0.1°C	0.16°C
6.704mV	150.0°C	150.0°C	0.0°C	0.16°C
9.288mV	200.0°C	200.1°C	0.1°C	0.15°C
12.013mV	250.0°C	250.0°C	0.0°C	0.15°C
14.862mV	300.0°C	300.0°C	0.0°C	0.15°C
17.819mV	350.0°C	350.1°C	0.1°C	0.15°C

(*) Segnale applicato secondo IEC 584-1 attraverso un giunto di riferimento esterno a 0°C in ghiaccio fondente

(*) *Signal applied according to IEC 584-1 by means of a 0°C (Ice melting point) external reference junction.*

Interpretiamo i dati esposti nel prospetto D:

- I dati evidenziati nell'area 7 ci mostrano le deviazioni delle misure fornite dal data logger rispetto ai valori di riferimento evidenziati nell'area 6. In altri termini, questi valori, possono essere definiti l'errore di misura del **DIGISTRIP 4S+ S/N 9811008**.
- I dati contenuti nell'area 8 sono le incertezze di taratura del data logger, espresse con coefficiente di copertura $k = 2$.

Valutiamo i contributi d'incertezza che interessano il campo di misura da 0°C a 260°C

Dai dati evidenziati nel certificato di taratura possiamo ricavare i seguenti contributi d'incertezza:

- h) L'incertezza di taratura (***Ic***) di ampiezza maggiore, è di **0.17°C**
- i) Lo scarto (errore) massimo di misura (***Em***) risulta di **0.1°C**
- j) Mentre la risoluzione (***Er***) è di **0.1°C**

Ora consultiamo le specifiche tecniche del DIGISTRIP 4S+ da cui possiamo ricavare i dati necessari per la stima dei contributi d'incertezza dovuti alla stabilità nel tempo (δ_{drift}), agli effetti dovuti alle condizioni ambientali (δ_{amb}), al gradiente di temperatura della morsettiere (δ_{bank}), ed alla sensibilità (δ_{sens}).

Dalle specifiche tecniche risultano i seguenti contributi d'incertezza:

- k) Per la stabilità a lungo termine (δ_{drift}), per l'ingresso in tensione ± 30 mV implicato nella misura delle termocoppie tipo "T", risulta: **$\pm(0.006\% \text{ of reading} + 2 \text{ count}^1 + 4 \mu\text{V})$** , riferiti all'ingresso ± 30 mV vale: $[30000 * 0.006 + (2 * 0.5) + 4] \mu\text{V} = 1.8 + 1 + 4 = 6.8 \mu\text{V}$. Questo contributo riferito alla misura della termocoppia tipo "T" nel campo di temperatura fino a 260°C corrispondenti a 12574 μV , vale: $6.8 * (12574 / 30000) \mu\text{V} = 2.9 \mu\text{V}$ corrispondenti a **0.05°C**.
- l) Per gli effetti dovuti alle condizioni ambientali (δ_{amb}), si ha: 0.01°C/°C, stimando di operare in ambiente a temperatura controllata entro $\pm 3^\circ\text{C}$ rispetto alla temperatura di riferimento il contributo d'incertezza è pari **0.03°C**.
- m) Il contributo d'incertezza (δ_{bank}), dovuto al gradiente di temperatura sulla morsettiere di connessione indicato in specifica è di **0.1°C**.
- n) Il contributo d'incertezza dovuto alla sensibilità (δ_{sens}) indicato in specifica, è di **0.5 μV corrispondenti a 0.008°C**

A questo punto abbiamo individuato tutti i dati necessari, per la stima dei contributi d'incertezza associati al data logger **DIGISTRIP 4S+ S/N 9811008**

Completata l'analisi dei dati, e stimati tutti i contributi d'incertezza associati al DIGISTRIP, si può procedere al calcolo dell'incertezza tipo composta (***uc***), sommando in quadratura sotto radice quadrata gli scarti tipo dei contributi d'incertezza elencati da h) a n), otteniamo:

$$u_{c(DIGI)} = \sqrt{\left(\frac{0.17}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.10}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.10}{2 * \sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.05}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.03}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.1}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.008}{\sqrt{3}}\right)^2} = 0.13^\circ\text{C} \quad [3]$$

Lo scarto tipo dell'incertezza associata al DIGISTRIP, verrà successivamente combinato con gli scarti tipo degli altri strumenti che compongono la catena metrologica del procedimento di taratura trattato.

Proseguiamo con l'analisi e la stima delle componenti d'incertezza associate al fornello di taratura HTR 400

1.4 A questo punto dobbiamo esaminare le specifiche tecniche del fornello di taratura **HTR 400** per individuare i contributi d'incertezza che devono essere computati nel calcolo dell'incertezza di taratura delle termocoppie per convalida dei processi di sterilizzazione.

In contributi d'incertezza sono:

¹ Nel campo di misura di ± 30 mV un count corrisponde a 0.5 μV

- o) La stabilità della temperatura (δ_{drift}) a breve termine, per temperature fino a 300°C risulta di: **0.02°C**.
- p) L'uniformità di temperatura fra foro e foro (δ_{unif}), per temperature fra 250°C e 350°C risulta di: **0.3°C**

Con questi due contributi d'incertezza l'analisi dei dati riferita al fornello calibratore **HTR 400** è completata, a questo punto si può procedere al calcolo dell'incertezza tipo composta (u_c), sommando in quadratura sotto radice quadrata gli scarti tipo dei contributi d'incertezza elencati da o) a p), otteniamo:

$$u_{c(HTR)} = \sqrt{\left(\frac{0.02}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.30}{\sqrt{3}}\right)^2} = 0.17 \text{ °C} \quad [4]$$

Completata l'analisi e calcolata, per ognuno degli elementi che costituiscono la catena metrologica del procedimento di taratura delle termocoppie per convalida dei processi di sterilizzazione, la rispettiva incertezza tipo composta (u_c), possiamo calcolare l'incertezza tipo del procedimento di taratura sommando in quadratura sotto radice quadrata i valori calcolati in [2], [3] e [4].

$$u_c = \sqrt{0.061^2 + 0.13^2 + 0.17^2} = 0.22 \text{ °C} \quad [5]$$

- 1.5 Dovendo stabilire un livello di confidenza del 95%, occorre moltiplicare il valore calcolato nella [5] per il coefficiente di copertura $k=2$, per cui l'incertezza estesa del procedimento di taratura di termocoppie tipo "T" risulta:

$$U_{95} = 0.22 * 2 = 0.44 \text{ °C}$$