

| | |
|---------------------------|--|
| Titolo/Title | Linea guida per la taratura di termometri a immersione <i>Guidelines for the calibration of immersion thermometers</i> |
| Sigla/Reference | DT-09-DT |
| Revisione/Revision | 00 |
| Data/Date | 20-05-2019 |

| | | | |
|---|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| Redazione | Approvazione | Autorizzazione all'emissione | Entrata in vigore |
| L'assistente del Responsabile del Sistema di Gestione | Il Direttore di Dipartimento | Il Direttore Generale | 20-09-2019 |

INDICE

| | |
|---|-----------|
| 1. PREMESSA | 3 |
| 2. SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE..... | 3 |
| 3. RIFERIMENTI NORMATIVI | 3 |
| 4. CONDIZIONI GENERALI..... | 5 |
| 5. RIFERIBILITÀ METROLOGICA | 6 |
| 6. TARATURA | 7 |
| 6.1. Dotazione del laboratorio | 7 |
| 6.2. Operazioni preliminari | 8 |
| 6.3. Misure e registrazione dei dati | 10 |
| 6.4. Elaborazione dei dati misurati..... | 14 |
| 7. CMC E STIMA DELL'INCERTEZZA | 15 |
| 7.1. Espressione dell'incertezza nella tabella di accreditamento | 16 |
| 7.2. Espressione dell'incertezza nel certificato di taratura | 17 |
| 7.3. Valutazione dell'incertezza di interpolazione per termometri a resistenza e termocoppie..... | 20 |
| 8. PRESENTAZIONE DEI RISULTATI DI MISURA | 21 |
| 8.1. Termometri a resistenza | 21 |
| 8.2. Termocoppie | 22 |
| 8.3. Catena termometrica (caso indicatore con sonda) | 22 |
| 8.4. Catena termometrica (caso trasmettitore con sonda) | 23 |
| 8.5. Termometro a dilatazione | 24 |
| ALLEGATO 1 - INFORMATIVO..... | 25 |

1. PREMESSA

Il presente documento annulla e sostituisce le linee guida SIT/Tec-001/01 rev.0, SIT/Tec-002/01 rev.0 e SIT/Tec-006/03 rev.0 utilizzate a supporto degli accreditamenti rilasciati per la grandezza temperatura fino alla data di pubblicazione del presente documento. I contenuti delle precedenti linee guida sono aggiornati ed integrati sulla base dello stato dell'arte e adeguati ai riferimenti internazionali in materia.

2. SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE

Il presente documento, redatto in collaborazione con l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM), ha lo scopo di fornire una linea guida generale per i laboratori che eseguono tarature di misuratori di temperatura in conformità alla ISO/IEC 17025 con lo scopo di uniformarne le procedure e la presentazione dei risultati di taratura.

I destinatari sono tutti i laboratori di taratura accreditati o in accreditamento nella grandezza temperatura, ma anche i laboratori accreditati in altre grandezze, o in prove o analisi che effettuano tarature interne di misuratori di temperatura. Inoltre tale linea guida è destinata ai valutatori ed agli esperti tecnici del settore "Temperatura" di ACCREDIA, per i quali costituisce una base comune per l'armonizzazione delle valutazioni.

Il documento non stabilisce requisiti aggiuntivi, ma fornisce indicazioni per l'applicazione e interpretazione di quanto già previsto nelle norme tecniche di riferimento. Qualora il laboratorio decidesse di non applicare le modalità qui indicate, dovrà dimostrare la validità ed adeguatezza allo scopo del proprio operato.

Applicando questo documento il laboratorio fornisce evidenza di conformità alla [2.10] (sia edizione 2005 che edizione 2018) ed ai requisiti ACCREDIA [2.18]. Metodi alternativi possono essere utilizzati, a condizione che diano evidenza di un risultato equivalente di conformità.

La guida interessa la taratura di termometri di tipo a immersione per confronto in mezzi comparatori (bagni termostatici e forni) eseguita in laboratorio. I termometri presi in considerazione sono:

- termometri a resistenza;
- termocoppie e cavi di estensione/compensazione;
- termometri a dilatazione (termometri a liquido, bimetallici, termometri a quadrante)
- catene termometriche composte da indicatore/trasmittitore in linea con sonda con uscita in tempo reale o differita (datalogger).

La guida non si applica alla taratura di termometri per la misura della temperatura dell'aria.

3. RIFERIMENTI NORMATIVI

Il presente documento fa riferimento a quanto prescritto dai seguenti documenti, nella revisione/edizione in corso di validità.

2.1 H. Preston-Thomas "The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)", Metrologia 27, 3-10 (1990).

2.2 BIPM "Techniques for approximating the International Temperature Scale of 1990".

- 2.3 BIPM "Guide on Secondary Thermometry - Thermistor Thermometry", 26 August 2014.
- 2.4 BIPM "Specialized Fixed Points above 0 °C", 18 November 2017.
- 2.5 ILAC G24:2007 "Guidelines for the determination of calibration intervals of measuring instruments".
- 2.6 EURAMET Calibration Guide n. 8 "Calibration of Thermocouples".
- 2.7 EURAMET Technical Guide n. 1 "Extrapolation of SPRT calibrations below the triple point of argon, 83.8058 K, and traceability in baths of liquid nitrogen at ~77.3 K".
- 2.8 ASTM E563-97 "Standard Practice for Preparation and Use of an Ice-Pint Bath as a Reference Temperature"
- 2.9 CEI EN 62828-3:2018 Reference conditions and procedures for testing industrial and process measurement transmitters - Part 3: Specific procedures for temperature transmitters
- 2.10 UNI CEI EN ISO/IEC 17025 "Requisiti generali per la competenza dei laboratori di prova e taratura".
- 2.11 UNI EN ISO 10012:2004 "Sistemi di gestione della misurazione - Requisiti per i processi e le apparecchiature di misurazione".
- 2.12 UNI CEI 70098-3:2016 "Incertezza di misura - Parte 3: Guida all'espressione dell'incertezza di misura".
- 2.13 UNI CEI 70099:2008 "Vocabolario Internazionale di Metrologia - Concetti fondamentali e generali e termini correlati (VIM)".
- 2.14 CEI EN 60751:2009 "Termometri industriali a resistenza di platino e sensori di temperatura in platino".
- 2.15 CEI EN 60584-1:2014 "Termocoppie Parte 1: Specifiche e tolleranze per la forza elettromotrice (FEM)".
- 2.16 CEI EN 60584-3:2009 "Termocoppie Parte 3: Cavi di estensione e di compensazione - Tolleranze e sistemi di identificazione".
- 2.17 "Politica sulla applicazione del requisito sulla riferibilità metrologica dei risultati delle misure per il Laboratori di Taratura e per i Produttori di Materiali di Riferimento", ACCREDIA 2015-06-18.
- 2.18 ACCREDIA, RT-25 "Prescrizioni per l'accREDITAMENTO dei Laboratori di Taratura",
- 2.19 ACCREDIA, DT-03-DT "Guida per la stesura delle procedure tecniche dei Laboratori Accreditati di Taratura".
- 2.20 ACCREDIA, DT-04-DT "Regole di scrittura per i Laboratori di taratura e per i Produttori di materiali di riferimento".
- 2.21 ACCREDIA, DT-05-DT "Introduzione ai criteri di valutazione dell'incertezza di misura nelle tarature".
- 2.22 ACCREDIA, RT-36 "Prescrizioni per l'accREDITAMENTO dei Laboratori di Taratura in materia di Confronti di misura".
- 2.23 ACCREDIA, IO-09-DT "Istruzione operativa sulla compilazione di Certificati di taratura/Documenti associati ai Materiali di Riferimento per i Laboratori di taratura/Produttori

di Materiali di Riferimento accreditati da ACCREDIA-DT – schema UNI CEI EN ISO/IEC 17025:2018 e schema UNI CEI EN ISO 17034:2017”.

- 2.24 A. Actis, L. Crovini, Temperature. Its Measurement and Control in Science and Industry, vol. 5, pp 819-828 (1982).
- 2.25 L. Crovini et al. Temperature. Its Measurement and Control in Science and Industry, vol. 6, pp. 1077-1082 (1992).
- 2.26 Fericola, V.C. & Iacomini, L. Int J Thermophys (2008) 29: 1817. <https://doi.org/10.1007/s10765-008-0463-4>

4. CONDIZIONI GENERALI

Il laboratorio ove si svolge l'attività di taratura deve possedere requisiti idonei per ridurre i parametri d'influenza e mantenerli sotto controllo. Nelle tarature di misuratori di temperatura per confronto, tipicamente è monitorata la temperatura e l'umidità dell'ambiente, che può essere critica per la strumentazione elettrica utilizzata.

Nella realizzazione del laboratorio è buona norma separare le linee di alimentazione di potenza (es. per i mezzi comparatori) dalle linee di alimentazione della strumentazione.

Nel caso in cui si prevedono tarature di termometri a dilatazione di liquido con incertezze di taratura inferiori a 0,05 °C, è necessaria misurare e dichiarare nel certificato di taratura la pressione dell'ambiente ove si è svolta l'attività di taratura.

Identificate le grandezze d'influenza ed i loro limiti, è necessario dotarsi di un idoneo sistema di monitoraggio che sia in grado di registrare continuamente o ad intervalli prefissati tali grandezze nei locali del laboratorio. Il monitoraggio deve avvenire impiegando strumentazione riferibile e, la valutazione deve considerare l'incertezza di taratura della strumentazione all'interno dei limiti identificati.

Inoltre all'interno del laboratorio si deve disporre di adeguati spazi di movimentazione, buona illuminazione, rumore ridotto e ove necessario, idonei impianti di aspirazione per fumi e vapori. Valutare, se necessario, l'impiego di sistemi di protezione dalle interferenze elettromagnetiche e dalle vibrazioni e l'installazione di filtri antipolvere per l'impianto di condizionamento.

Poiché i metodi di taratura di misuratori di temperatura non si basano su metodi standardizzati, il laboratorio deve avere adeguata documentazione tecnica, che contenga, oltre ai requisiti [2.19] quanto segue:

- a. scopo e campo di applicazione;
- b. una descrizione dettagliata del metodo di taratura;
- c. la validazione del metodo mediante l'analisi di dati soddisfacenti riguardanti il settore di interesse (bibliografia, risultati della partecipazione a confronti interlaboratorio [2.22], tarature ripetute, ecc.);
- d. descrizione delle attrezzature e dei campioni utilizzati, delle loro connessioni (schema di misura), e delle relative attività di manutenzione e conferma metrologica;

- e. valutazione delle incertezze di misura (descrizione dettagliata della tecnica di calcolo tenendo conto di tutte le componenti, calcolo delle migliori incertezze possibili e criteri per stimare l'incertezza di taratura, ecc);
- f. esempi di risultati di taratura;
- g. modelli dei certificati di taratura che saranno rilasciati sotto accreditamento;
- h. informazioni sui locali e condizioni del luogo ove si svolge l'attività di taratura (piani di laboratorio, registrazioni delle condizioni ambientali);
- i. qualsiasi altro documento che il laboratorio ritenga utile per dimostrare l'effettiva validazione del metodo richiesto all'accreditamento.

5. RIFERIBILITÀ METROLOGICA

I termometri campione usati da un laboratorio devono essere tarati e devono essere riferibili alla ITS-90 [2.1, 2.2].

Le tarature di tutti i dispositivi di riferimento necessari devono essere eseguiti da un laboratorio qualificato, in linea con la politica ACCREDIA sulla riferibilità [2.17].

La strumentazione di misura (campioni di lavoro e di riferimento e strumenti ausiliari) deve essere mantenuta in modo da non pregiudicarne lo stato di conferma metrologica e in un ambiente adeguato. In generale, la periodicità di taratura dei campioni di riferimento e di lavoro dipendono dalle condizioni d'uso [2.5]. Poiché diversi dispositivi di misurazione della temperatura possono essere utilizzati in un'ampia varietà di condizioni, non è possibile indicare in questo documento intervalli di taratura specifici. In ogni caso, dovrebbero essere disponibili registrazioni (es. da controlli regolari "tra tarature", analisi sperimentali e/o statistiche, specifiche del costruttore) per dimostrare che la periodicità di taratura è stata definita in modo che la taratura avvenga prima che si verifichino cambiamenti significativi nel comportamento dello strumento [2.11].

Usualmente, l'intervallo di taratura dei termometri campione di riferimento è un anno, mentre i campioni di lavoro sono tarati con periodicità semestrale e verificati ogni tre mesi.

Per misurazioni caratterizzate da più di una grandezza d'ingresso del modello di misura ciascuno dei valori in ingresso dovrebbe essere di per sé metrologicamente riferibile e la gerarchia di taratura che ne deriva può formare una struttura ramificata o una rete.

Per stabilire la riferibilità metrologica delle misure effettuate, è necessario identificare la catena di riferibilità metrologica impiegata. È utile rappresentare la catena di riferibilità metrologica per via grafica. In figura 1, un esempio di schema di catena di riferibilità ove le linee verticali rappresentano le tarature che collegano i campioni utilizzati dal laboratorio ai campioni nazionali e quelle orizzontali, gli strumenti, mezzi ed apparati su cui si ripercuotono i fattori d'influenza che intervengono nelle tarature.

Nell'attività di taratura, ove possibile, è consigliato l'uso di due termometri campione di lavoro con una documentata tolleranza sul loro accordo. In questo modo l'attività di taratura sarà mutuamente auto-verificata.

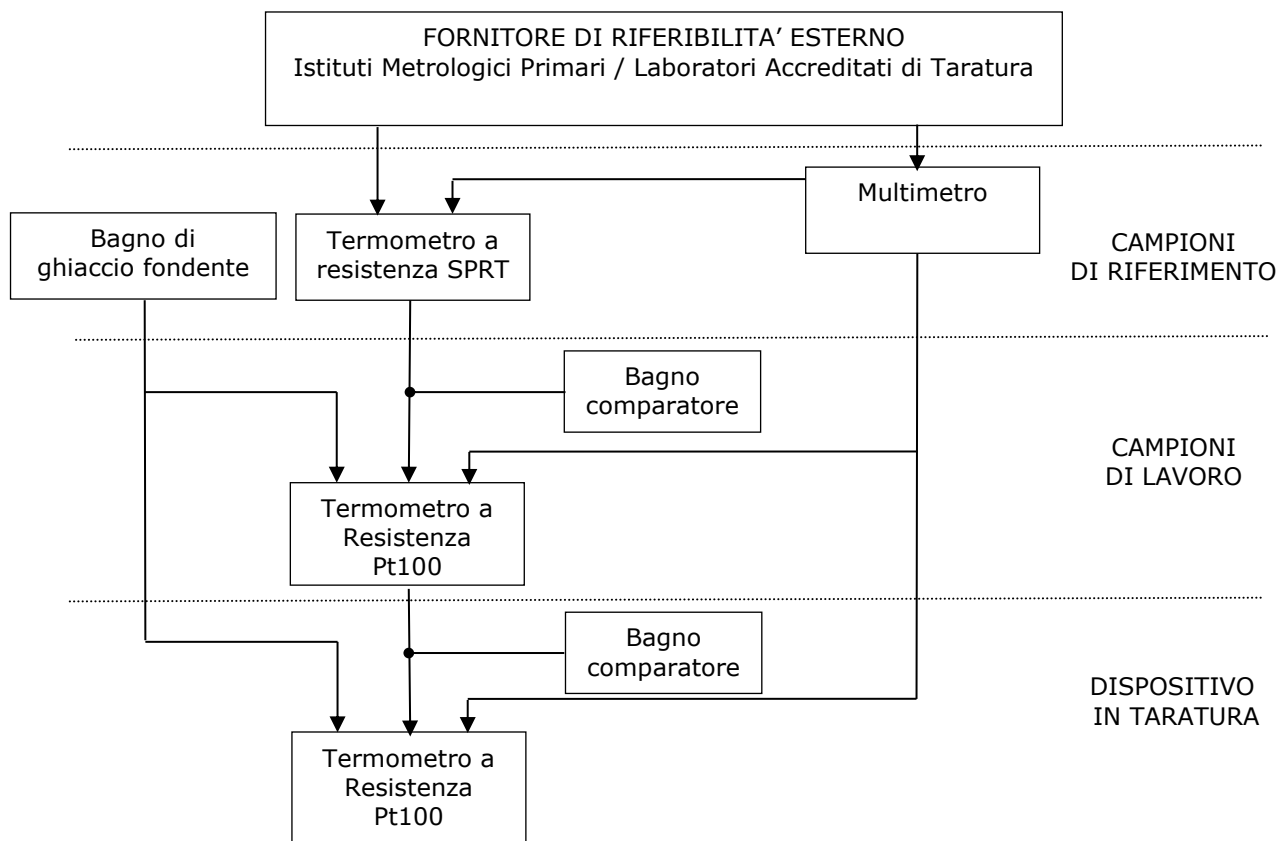


Figura 1: Esempio di schema di catena di riferibilità per la taratura di un termometro a resistenza Pt100 per confronto in bagno termostatico.

6. TARATURA

6.1. Dotazione del laboratorio

Il metodo di taratura per confronto consiste nel porre i termometri in taratura ed i termometri di riferimento all'interno della zona di migliore uniformità/stabilità nota di un mezzo comparatore ove si genera e si mantiene la temperatura (bagni o forni adeguati allo scopo).

Le apparecchiature necessarie alla taratura variano in funzione non solo del tipo di strumento da tarare, ma anche e soprattutto del campo di temperatura che si vuole coprire.

Un laboratorio tipicamente è dotato di:

- bagni termostatici impieganti fluidi di lavoro quali alcool, fluido siliconico, acqua, sali fusi, a letto fluido di allumina che coprono un campo da -80 °C a 600 °C;
- vaso dewar per realizzare il punto di ebollizione dell'azoto a circa -196 °C;
- fornaci orizzontali o verticali per temperature tra 400 °C a 1550 °C;
- campioni di riferimento, tipicamente:
 - attrezzature e materiali per realizzare il bagno di ghiaccio fondente a 0 °C (vasi dewar, acqua pura [2.8], generatore di ghiaccio a scaglie,...) [2.4];

- termometri a resistenza di platino SPRT da 25,5 ohm [2.1, 2.2] per temperature da -196 °C [2.7] sino a 660 °C;
 - termocoppie a metallo nobile per temperature tra 600 °C e 1550 °C [2.2];
 - catene termometriche composte da indicatore con PRT o TC;
- e. campioni di lavoro, tipicamente:
- termometri a resistenza di platino, usualmente Pt100 per temperature sino a 600 °C;
 - termocoppie a metallo nobile per temperature tra 600 °C e 1550 °C;
 - catene termometriche composte da indicatore con PRT o TC;
 - cavi di estensione e compensazione per termocoppie;
- f. altra strumentazione, apparecchiature e campioni che possono essere utili per l'attività:
- resistori campione (da 10 Ω , 25 Ω e da 100 Ω), per verifiche di strumentazione elettrica o misure di resistenza impiegando ponti di misura;
 - ponti per le misure dei rapporti di resistenza;
 - multimetri per le misure di *fem* e resistenza;
 - calibratori di tensione, per verifiche su strumentazione elettrica;
 - conduttivimetro per la misura della conducibilità dell'acqua;
 - contenitori termostatici per ghiaccio (vaso dewar);
 - commutatore manuale o automatico a basso rumore di contatto;
 - sistemi di acquisizione elaborazione e registrazione automatici o manuali;
 - misuratori dei parametri ambientali (temperatura, umidità relativa; pressione, ecc).

Per ciascun settore, è necessario riportare lo schema di misura completo dove siano identificati tutti i dispositivi ed i campioni impiegati nella taratura.

I mezzi comparatori impiegati per le tarature devono essere adeguatamente caratterizzati al fine di determinare i contributi di incertezza relativi alle caratteristiche di uniformità spaziale della temperatura nel volume di lavoro e di stabilità temporale.

Le caratteristiche di stabilità e uniformità della temperatura nel volume di lavoro possono essere ridotte mediante l'uso di opportuni blocchi equalizzatori aventi fori per ospitare gli strumenti di riferimento e in taratura.

6.2. Operazioni preliminari

Prima di eseguire le operazioni di taratura, è necessario sottoporre a verifiche preliminari gli strumenti in taratura. Di seguito un elenco di possibili controlli, che possono essere previsti:

- a. esame visivo di completezza e integrità del termometro in taratura;
- b. verifica della continuità elettrica per termocoppie e termoresistenze;
- c. verifica del corretto funzionamento per strumenti trasmettitori, indicatori e registratori, ad esempio simulando i sensori collegabili (termocoppie o termoresistenze) attraverso un calibratore come sorgente di *fem* o di resistenza.

Nel caso in cui si riscontrino danni, difetti o anomalie, il cliente deve essere informato. Questo vale anche per informazioni non chiare o incomplete sull'ambito della taratura.

Inoltre, è necessario che lo strumento permanga prima della sua taratura nel locale del laboratorio in cui le condizioni ambientali sono controllate per il tempo necessario affinché raggiunga l'equilibrio termico con l'ambiente, e che sia alimentato per un tempo sufficiente per la sua stabilizzazione.

Il sistema di misura impiegato deve essere predisposto e verificato, in particolare:

- identificati i campioni da utilizzare, questi devono essere muniti di certificato di taratura valido;
- la strumentazione elettrica utilizzata (es. multimetri, resistori di riferimento e ponti) deve essere accesa per un tempo sufficiente per la loro stabilizzazione;
- tutti i collegamenti dovrebbero essere realizzati con appositi cavi a bassa *fem*;
- nel caso si debba realizzare il giunto di riferimento delle termocoppie, l'unione dei fili con i conduttori di rame può essere effettuata mediante saldatura con stagno a bassa *fem*. In alternativa è possibile l'impiego di cavi di estensione che siano muniti di certificato di taratura valido;
- nel caso di taratura di termocoppie, il giunto di riferimento usualmente è posto a 0 °C. Tale temperatura può essere realizzata attraverso il punto fisso del ghiaccio fondente, oppure con giunto freddo elettronico.

Preparare il punto fisso del ghiaccio fondente (ovvero in vaso dewar riempito di ghiaccio tritato ottenuto da acqua deionizzata) per la realizzazione della temperatura a 0 °C.

In funzione del programma di taratura da eseguire (vedi paragrafo successivo), accendere ed impostare le relative temperature di set point sui bagni termostatici e forni.

Tutte le operazioni eseguite devono essere registrate.

Nel caso di taratura di misuratori con uscita in formato digitale con utilizzo di software applicativo fornito a corredo dello strumento, può essere necessario dover installare tale software su un pc del laboratorio. In tal caso è necessario assicurare la protezione e salvaguardia del Sistema Informatico del Laboratorio (SIL) e la registrazione dei parametri di configurazione per garantire la ripetizione della misura. In particolare, è opportuno che il laboratorio utilizzi a questo scopo un computer appositamente dedicato in modo che non interferisca (ad esempio scollegato dalla LAN aziendale) con il resto dei pc del SIL.

La registrazione dei dati, sarà fatta su un apposito file di log prodotto da questi programmi, e riportata nei registri di raccolta dati dall'operatore.

Preliminarmente alle tarature devono essere registrate le seguenti informazioni:

- identificazione del nome, del produttore, del numero di serie e/o della versione e/o data di revisione del software applicativo;
- identificazione di qualsiasi parametro di configurazione, utilizzato nella esecuzione delle misure (per esempio, la velocità di lettura, la risoluzione, il tipo di filtro, ecc.);
- identificazione di qualsiasi coefficiente di taratura dei trasduttori utilizzati dal sistema, modificato o non modificato dal laboratorio, nella esecuzione delle misure;
- identificazione dei parametri di configurazione della linea di comunicazione:

- ✓ RS232, RS485, RS422: baud rate, handshake, parità e bit di stop (rilevabili nei parametri di configurazione della comunicazione);
- ✓ Modem: protocollo di trasmissione, baud rate, handshake, parità e bit di stop (rilevabili nei parametri di configurazione del modem);
- ✓ Radio: protocollo di trasmissione, baud rate, handshake, parità e bit di stop (rilevabili nei parametri di configurazione del modem radio);
- ✓ IEEE488: costruttore della scheda e revisione dei driver SW di gestione della scheda;
- ✓ USB: non necessita alcuna indicazione specifica;
- ✓ Ethernet: protocollo utilizzato;
- ✓ HW dedicato: costruttore della scheda e revisione dei driver SW di gestione della scheda.

In caso di comunicazione in modalità attiva deve essere mantenuta la registrazione delle sequenze di comandi di configurazione inviati (log automatico del software applicativo, se predisposto, manuale in caso contrario).

6.3. Misure e registrazione dei dati

Il numero di punti di taratura deve essere concordato tra il cliente e il laboratorio e non può essere inferiore a tre. Nel caso in cui si debba determinare la funzione caratteristica del termometro, il numero di punti deve essere adeguatamente incrementato, facendo riferimento ai criteri riportati nel paragrafo "Elaborazione dei dati misurati".

Tra i punti di taratura scelti, devono essere presenti gli estremi del campo di temperatura in cui si esegue la taratura, il punto a 0 °C (ed eccezione delle termocoppie) e per i termometri a resistenza il punto a 100 °C (se questo è all'interno del campo di taratura) per il calcolo del coefficiente di temperatura α .

In generale, le operazioni di misura da eseguire sono le seguenti:

- effettuare, ove possibile, la verifica iniziale a 0 °C nel bagno di ghiaccio fondente (ovvero in vaso dewar riempito di ghiaccio tritato ottenuto da acqua pura): inserire i termometri nel ghiaccio fondente per una lunghezza sufficiente affinché l'elemento sensibile raggiunga l'equilibrio termico con il ghiaccio e l'effetto di conduzione termica dello stelo sia trascurabile; effettuare almeno 10 letture del segnale del termometro in taratura, registrare tali valori ed eventualmente confrontarli con i valori della taratura precedente se disponibili;
- inserire il termometro campione e quello in taratura nel previsto bagno o forno nella zona di misura identificata ed attendere la stabilizzazione (l'operazione di inserimento può essere effettuata anche prima dell'arrivo al set-point di temperatura, in funzione delle caratteristiche costruttive dei termometri) ed assicurarsi che gli elementi sensibili del campione e dei termometri in taratura siano alla stessa profondità d'immersione;
- attendere un tempo sufficiente affinché si stabilizzi la temperatura: questo tempo dipende dalle dimensioni del termoelemento e dalla capacità termica del bagno o forno comparatore. La taratura di un termometro avviene dopo aver raggiunto l'equilibrio termico sia del campione di lavoro che del termometro in taratura;
- effettuare almeno 10 letture del segnale del termometro campione e di quelli in taratura nella sequenza: campione, termometro 1, termometro 2, termometro n , campione. È buona norma,

concluso il ciclo di misura, verificare se le letture del campione di lavoro siano entro il limite di stabilità definito attraverso la caratterizzazione del mezzo comparatore. In caso affermativo si passa al punto successivo, altrimenti si intraprenderanno le azioni previste;

- ripetere le predette operazioni per tutti gli altri punti di taratura previsti;
- ripetere, a fine ciclo di taratura ove possibile, il punto a 0 °C per la stima della stabilità a breve del termometro in taratura.

Nel caso di taratura di termometri a stelo, è necessario verificare che tali termometri in taratura siano immersi ad una profondità d'immersione sufficiente a evitare perdite di calore ad alta temperatura (o viceversa) per effetto della conduzione dello stelo del termometro. Tale effetto è maggiore, quanto è maggiore il diametro dei conduttori del termometro, degli isolanti e delle sue guaine. Ove possibile, il termometro dovrebbe essere progressivamente immerso nel mezzo comparatore, in modo da controllare che non si verifichino cambiamenti sul segnale elettrico a fronte di variazioni di immersione (nell'ipotesi che non ci siano gradienti di temperatura nel volume di lavoro del mezzo comparatore). Ottenere un segnale stabile, non significa necessariamente che sia stata raggiunta la temperatura corretta: un'adeguata immersione è dimostrata solo se la variazione del segnale misurato sollevando il termometro in taratura di uno o due centimetri è di un ordine di grandezza inferiore rispetto all'incertezza di taratura. Nel caso in cui è necessario tarare termometri con profondità d'immersione ridotta, il metodo di taratura deve essere adeguatamente documentato e validato.

Le catene termometriche possono essere classificate in base alla presenza o meno dell'indicatore, alla modalità di trasmissione dati e al numero di sonde di lettura contemporanea. La trasmissione dati può avvenire nella modalità:

- "in tempo reale": il misuratore può trasmettere dati in modalità di comunicazione "passiva" (in base a comandi gestiti dal pannello di comando e non può interagire con il software applicativo) o "attiva" (Il misuratore trasmette dati in base a comandi gestiti attraverso la comunicazione con il software applicativo);
- "differita" (modalità datalogger): il misuratore, durante la taratura, registra i valori rilevati dalla sonda/e in una memoria interna, associando i valori al tempo (data/ora) di registrazione. Al termine del ciclo di taratura, il misuratore viene connesso al personal computer e trasmette in modalità attiva o passiva la registrazione dei dati rilevati dalla sonda/e.

Nel caso di taratura di un misuratore a trasmissione in tempo reale con più sonde connesse, è necessaria l'identificazione univoca del canale attivo nella stringa di trasmissione dati, o deve essere effettuata la taratura di un singolo canale alla volta. La registrazione e l'identificazione, sarà fatta a cura dell'operatore nei diversi moduli di raccolta dati.

Nel caso di taratura di un misuratore con trasmissione differita dei dati, questo deve produrre una registrazione completa con data e ora di lettura. Per il confronto dei dati, il SIL dovrà essere fornito di un sistema di misura del tempo e dovrà essere possibile attivare e registrare l'istante di tempo di AVVIO e TERMINE delle misure. Il clock del datalogger in taratura può essere fuori sincrono rispetto l'orario reale o quello indicato dai metodi di registrazione dei dati del laboratorio, quindi deve essere eseguita una sincronizzazione del clock dello strumento in taratura con quello del sistema di registrazione dati. In altri termini, per la sincronia delle letture tempo/grandezza di uscita, anche il SIL del laboratorio, dovrà produrre una registrazione tempo/grandezza del campione impiegato, in

cui siano univocamente identificabili gli istanti di AVVIO e TERMINE della registrazione del misuratore, al fine di correlarne gli andamenti. Non è necessario che il sistema di riferimento e lo strumento in taratura abbiano la stessa frequenza di lettura e non è necessario che i dati siano registrati alla stessa frequenza, ma devono essere entrambi letti a frequenza costante. Ogni canale del misuratore dovrà essere univocamente rintracciabile sulla registrazione e singolarmente riferibile alle letture effettuate con il campione di riferimento.

I dati rilevati del campione e dei sensori in taratura costituiscono i dati in originale della taratura e devono essere registrati secondo i requisiti di norma completi delle informazioni necessarie [2.10].

Può essere utile corredare i dati in originale con una prima fase di elaborazione dati ove vengono calcolate i valori medi del campione e dello strumento in taratura e le necessarie conversioni in temperatura per determinare la temperatura di riferimento. Esempi di registrazione dei dati in originale sono riportati in Figura 2 e Figura 3.

Punto di misura: xxx,xx °C

Operatore: _____

| | | |
|-------------------------------------|--------------------------------|--|
| Matricola del campione: _____ | | Matricola termometro in taratura: _____ |
| Valore medio del campione: _____ | | Valore medio del misurando: _____ |
| Deviazione standard: _____ | | Deviazione standard: _____ |
| Valore letto Ω , mV | Valore corrispondente °C | Valore in unità del misurando Ω , mV, mA, °C |
| 1 | | |
| 2 | | |
| 3 | | |
| 4 | | |
| 5 | | |
| 6 | | |
| 7 | | |
| 8 | | |
| 9 | | |
| 10 | | |

Figura 2: Esempio di registrazione delle misure.

In figura 3 è riportato un esempio dei dati registrati in una taratura effettuata a due diversi valori stazionari e relativa analisi dei dati e confronto tra campione e strumento in taratura. I punti di INIZIO e FINE registrazione sincronizzati consentono di calcolare le medie del campione e del misuratore in prova, a partire da valori riferiti agli stessi tempi.

La misura può essere acquisita o dopo un certo tempo dall'impostazione di un set point (se il sistema è opportunamente caratterizzato), oppure al termine di un transitorio, entro dei limiti massimi senza andamento monotono crescente o decrescente.

Figura 3: Esempio di registrazione delle misure nel caso di taratura di un datalogger

| DATI REGISTRATI | | | | |
|---------------------|--------|--------|------------------------|--------|
| Termometro campione | | | Termometro in taratura | |
| Tempo | T / °C | | Tempo | T / °C |
| 00:00:00 | 20,02 | INIZIO | 00:00:00 | 20,0 |
| 00:00:30 | 20,06 | | 00:01:00 | 20,0 |
| 00:01:00 | 20,04 | | 00:02:00 | 20,0 |
| 00:01:30 | 19,92 | | 00:03:00 | 20,0 |
| 00:02:00 | 20,03 | | 00:04:00 | 20,0 |
| 00:02:30 | 20,05 | | 00:05:00 | 20,1 |
| 00:03:00 | 20,00 | | 00:06:00 | 20,1 |
| 00:03:30 | 19,98 | | 00:07:00 | 20,1 |
| 00:04:00 | 19,99 | | 00:08:00 | 20,0 |
| 00:04:30 | 19,97 | | 00:09:00 | 20,0 |
| 00:05:00 | 20,02 | | 00:10:00 | 20,0 |
| 00:05:30 | 20,06 | | 00:11:00 | 20,0 |
| 00:06:00 | 20,04 | | 00:12:00 | 20,0 |
| 00:06:30 | 20,10 | | 00:13:00 | 20,1 |
| 00:07:00 | 20,13 | | 00:14:00 | 21,0 |
| 00:07:30 | 20,09 | | 00:15:00 | 22,0 |
| 00:08:00 | 20,06 | | 00:16:00 | 23,0 |
| 00:08:30 | 20,05 | | 00:17:00 | 25,0 |
| 00:09:00 | 20,03 | | 00:18:00 | 24,0 |
| 00:09:30 | 20,01 | | 00:19:00 | 25,0 |
| 00:10:00 | 19,96 | | 00:20:00 | 24,7 |
| 00:10:30 | 20,09 | | 00:21:00 | 24,9 |
| 00:11:00 | 20,29 | | 00:22:00 | 25,0 |
| 00:11:30 | 20,47 | | 00:23:00 | 25,0 |
| 00:12:00 | 20,88 | | 00:24:00 | 25,0 |
| 00:12:30 | 21,50 | | 00:25:00 | 25,0 |
| 00:13:00 | 22,40 | | 00:26:00 | 25,0 |
| 00:13:30 | 23,46 | | 00:27:00 | 24,9 |
| 00:14:00 | 24,46 | | 00:28:00 | 24,9 |
| 00:14:30 | 24,78 | | 00:29:00 | 24,9 |
| 00:15:00 | 25,03 | | 00:30:00 | 24,9 |
| 00:15:30 | 25,06 | | 00:31:00 | 25,0 |
| 00:16:00 | 25,00 | | 00:32:00 | 25,0 |
| 00:16:30 | 25,18 | | 00:33:00 | 25,0 |
| 00:17:00 | 25,22 | | 00:34:00 | |
| 00:17:30 | 25,13 | | 00:35:00 | |
| 00:18:00 | 25,03 | | 00:36:00 | |
| 00:18:30 | 25,03 | | 00:37:00 | |
| 00:19:00 | 24,99 | | 00:38:00 | |
| 00:19:30 | 24,94 | | 00:39:00 | |
| 00:20:00 | 24,90 | | 00:40:00 | |
| 00:20:30 | 24,98 | | 00:41:00 | |
| 00:21:00 | 25,00 | | 00:42:00 | |
| 00:21:30 | 25,03 | | | |
| 00:22:00 | 25,02 | | | |
| 00:22:30 | 25,03 | | | |
| 00:23:00 | 25,02 | | | |
| 00:23:30 | 25,01 | | | |
| 00:24:00 | 25,00 | | | |
| 00:24:30 | 24,98 | | | |
| 00:25:00 | 24,99 | | | |
| 00:25:30 | 25,00 | | | |
| 00:26:00 | 25,01 | | | |
| 00:26:30 | 25,03 | | | |
| 00:27:00 | 25,02 | | | |
| 00:27:30 | 25,03 | | | |
| 00:28:00 | 25,02 | | | |
| 00:28:30 | 25,01 | | | |
| 00:29:00 | 25,00 | | | |
| 00:29:30 | 25,00 | | | |
| 00:30:00 | 24,99 | | | |
| 00:30:30 | 24,99 | | | |
| 00:31:00 | 24,98 | | | |
| 00:31:30 | 25,02 | | | |
| 00:32:00 | 25,00 | FINE | | |

| DATI TABELLA CERTIFICATO | | |
|--------------------------|---------------------|------------------------|
| N. Punti | Termometro campione | Termometro in taratura |
| 1 | 20,05 | 20,0 |
| 2 | 25,01 | 25,0 |

Medie termometro campione

Medie termometro in taratura

Nel caso di datalogger, può essere utile mantenere una registrazione di tipo grafico come riportato in figura 4

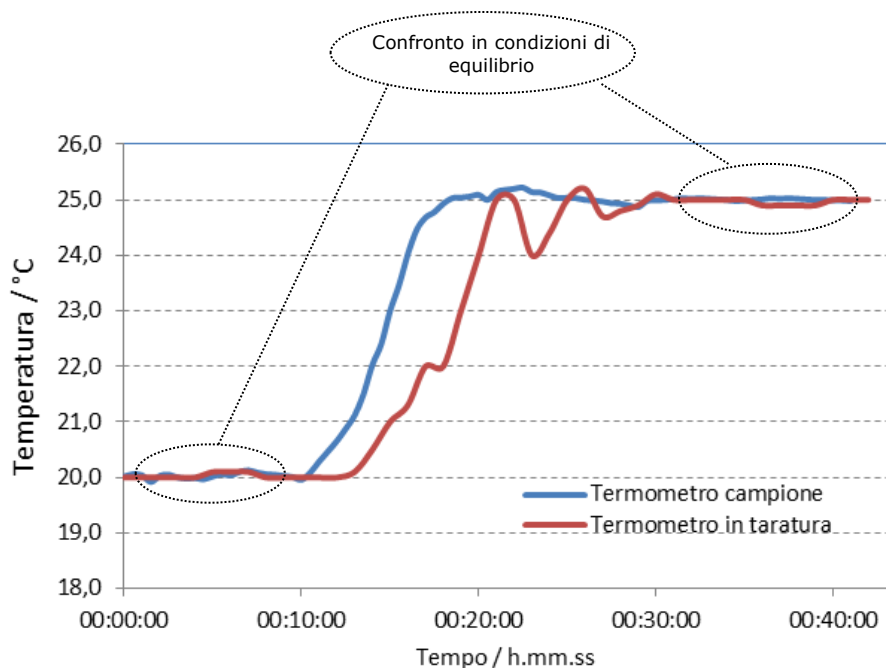


Figura 4: Esempio di registrazione di tipo grafico (es. caso dei datalogger)

6.4. Elaborazione dei dati misurati

Le tarature di termometri a resistenza e termocoppie possono essere caratterizzate anche attraverso la determinazione delle costanti specifiche della curva che rappresenta l'andamento del loro segnale in funzione della temperatura (t).

La curva è rappresentata numericamente da una funzione polinomiale del tipo:

$$y = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + \dots + a_pt^p \quad [1]$$

L'elaborazione dei dati permetterà di ricavare i coefficienti a_0, a_1, \dots, a_p del polinomio, la loro matrice di varianza-covarianza e la tabella di taratura a partire dai punti ricavati sperimentalmente, ad esempio con il metodo dei minimi quadrati.

Per i termometri a resistenza di tipo industriale ($\alpha = 0,00385 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), l'equazione [1] si trasforma secondo quanto riportato in [2.14], quindi y rappresenta R/R_0 :

- polinomio del 2° ordine sopra 0 °C

$$R/R_0 = 1 + At + Bt^2 \quad [2a]$$

- polinomio del 4° ordine sotto 0 °C

$$R/R_0 = 1 + At + Bt^2 + C(t-100)t^3 \quad [2b]$$

Per i termometri a resistenza da utilizzare sotto 0 °C sulla base di [2.24, 2.25], dalla letteratura è noto che è una buona pratica:

- estrapolare la curva ricavata sopra 0 °C fino a -40 °C;
- determinare il coefficiente C per temperature inferiori a -40 °C.

Altre equazioni possono essere impiegate, purché il modello sia chiaramente dichiarato sul certificato di taratura. Ad esempio, è possibile applicare le equazioni della ITS-90 [2.1] anche su termometri a resistenza di tipo industriale [2.14]. Per far ciò, è importante far riferimento a documentazione e studi che applicano tale modello, basato sulla taratura ai punti fissi della ITS-90 di termometri a resistenza campione (SPRT) ad una taratura di termometri a resistenza industriali tarati (es. [2.26]).

Se richiesto, sul certificato di taratura deve essere chiaramente identificato il polinomio utilizzato per il calcolo delle costanti, con la relativa incertezza d'interpolazione.

Per le termocoppie, valgono le equazioni riportate nella [2.15] (polinomi dell'*n*-esimo ordine in relazione al tipo di termocoppia ed all'intervallo di temperatura considerato).

La stima dei coefficienti di queste equazioni, in genere di grado elevato, richiede molti punti di taratura, pertanto per la loro caratterizzazione si ricorre al calcolo di un polinomio di secondo grado, che approssima la curva delle differenze (ΔE) tra i valori misurati (E_m) e quelli di riferimento (E_r):

$$\Delta E = E_m - E_r \quad [3a]$$

Essi vengono elaborati con il metodo dei minimi quadrati utilizzando l'equazione:

$$\Delta E = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_n t^n \quad [3b]$$

Per la determinazione del polinomio di interpolazione della termocoppia in taratura, si deve combinare il polinomio di riferimento della termocoppia con il polinomio delle differenze dell'equazione 3b, ottenendo così un unico polinomio che consenta di ottenere la tabulazione dei valori puntuali (in gradi Celsius) e delle loro derivate (in $\mu V/^\circ C$) del segnale della termocoppia in taratura.

7. CMC E STIMA DELL'INCERTEZZA

Nel caso di laboratorio di taratura accreditato, la CMC è la capacità di misura e di taratura disponibile ai clienti in condizioni di lavoro abituali, come descritto all'interno dello scopo di accreditamento (tabella di accreditamento), pubblicato da ACCREDIA.

La valutazione dell'incertezza di misura si ottiene tenendo conto almeno dei contributi dovuti alle seguenti cause, ipotizzando per ognuna una distribuzione di probabilità statistica come previsto dalla letteratura [2.12, 2.21]:

- taratura del campione (dal certificato di taratura);
- stabilità del campione (dati sperimentali e del costruttore);
- eventuale interpolazione sul campione (dal certificato di taratura);
- stabilità e uniformità del mezzo comparatore (dati sperimentali da caratterizzazione);
- strumento per la misura del campione (taratura, deriva, risoluzione, ecc.);
- strumento per la misura dello strumento in taratura (taratura, deriva, risoluzione, ecc.);
- operatore;
- termometro in taratura.

Tali contributi d'incertezza vengono considerati tra loro non correlati. È opportuno riportare tali contributi in un bilancio d'incertezza, organizzato in tabella come proposto da [2.21]. Nella tabella del bilancio d'incertezza sono riportate le grandezze d'ingresso, con la loro stima ed incertezza tipo, con i relativi coefficienti di sensibilità, per definire i singoli contributi all'incertezza tipo e la stima dell'incertezza tipo composta $u(y)$.

Ogni CMC pubblicata sulla tabella di accreditamento deve far riferimento a una o più tabelle di bilanci d'incertezza, usualmente riportati nella documentazione tecnica.

In ambito EA si è stabilito che i laboratori accreditati da membri firmatari del EA-MLA esprimano l'incertezza estesa di misura U , ottenuta moltiplicando l'incertezza tipo di una stima d'uscita per un fattore di copertura k .

$$U = k u(y) \quad [4]$$

Nei casi in cui al misurando si possa attribuire una distribuzione normale (gaussiana) e l'incertezza tipo associata alla grandezza d'uscita abbia sufficiente affidabilità, si potrà usare un fattore di copertura $k = 2$. L'incertezza estesa così ottenuta corrisponde approssimativamente ad una probabilità di copertura del 95%. Queste condizioni sono soddisfatte nella maggior parte dei contesti pratici per un'attività di taratura.

L'ipotesi di una distribuzione normale non può sempre essere facilmente confermata sperimentalmente. Tuttavia nei casi in cui, all'incertezza tipo composta contribuiscano parecchie componenti dell'incertezza (indicativamente 3 o più), originate da ben note distribuzioni di probabilità di grandezze indipendenti (ad esempio distribuzioni normali o distribuzioni rettangolari, con contributi dello stesso ordine di grandezza), le condizioni del Teorema del Limite Centrale sono soddisfatte e si può assumere con un buon grado di approssimazione che la distribuzione della grandezza d'uscita sia normale.

L'affidabilità dell'incertezza tipo composta è determinata dai suoi gradi di libertà [2.12]. L'affidabilità è comunque sufficiente se nessuno dei contributi all'incertezza è ottenuto con una valutazione di categoria A, basata su un numero di osservazioni inferiore a dieci.

7.1. Espressione dell'incertezza nella tabella di accreditamento

L'espressione dell'incertezza di misura ai fini della dichiarazione della CMC riportata nella tabella di accreditamento deve tener conto del contributo d'incertezza dato dai campioni di riferimento valutato a partire dalla strumentazione e dalle apparecchiature del Laboratorio (u_{lab}). Il contributo u_{lab} è dato dall'incertezza composta dei contributi di categoria A e di categoria B (incertezze tipo) provenienti dai campioni del Laboratorio (termometri a resistenza, termocoppie, o catene termometriche), dalle apparecchiature (forni, bagni, ecc.), dalla strumentazione di misura (ponti di misura, multimetri, ecc.), dall'operatore e dalle condizioni ambientali.

Ai fini della dichiarazione della CMC, è necessario tener conto anche del contributo d'incertezza proveniente dal "miglior sensore esistente" (best existing device BED) u_{BED} . La U_{CMC} è calcolata con la seguente relazione:

$$U_{CMC} = 2\sqrt{u_{lab}^2 + u_{BED}^2} \quad [6]$$

Il contributo u_{BED} , varia da sensore a sensore ed è necessariamente di categoria B in quanto proveniente da valutazioni a priori (specifiche tecniche, esperienza, altro). A titolo informativo,

nell'allegato 1 sono riportati valori di u_{BED} che possono essere utilizzati per il calcolo della U_{CMC} , desunti dalle CMC degli istituti metrologici primari che compaiono nell'appendice C dell'Accordo di mutuo riconoscimento (MRA) redatto dal Comitato Internazionale dei pesi e misure (CIPM). Altri valori di u_{BED} possono essere utilizzati, opportunamente documentati e valutati da ACCREDIA.

7.2. Espressione dell'incertezza nel certificato di taratura

L'espressione dell'incertezza di misura da riportare nel certificato di taratura emesso da un laboratorio accreditato dovrà tenere conto del contributo d'incertezza u_{lab} e del contributo proveniente dallo strumento in taratura (u_{sens}). Questo secondo contributo comprende le incertezze di categoria A (ad es. la ripetibilità) e di categoria B (ad es. la stabilità a breve termine, la risoluzione del display nel caso di strumenti con indicatore digitale).

Nella tabella dei risultati sperimentali riportati nel certificato di taratura deve essere presente la colonna dell'incertezza estesa U per ogni punto sperimentale, calcolata con la seguente relazione:

$$U = 2 \cdot \sqrt{u_{lab}^2 + u_{sens}^2} \quad [6]$$

con $k = 2$, corrispondente ad un livello di fiducia pari al 95%.

L'incertezza estesa U indicata nel certificato di taratura non può mai essere inferiore all'incertezza di taratura accreditata (U_{CMC}). Nel caso in cui si esegue l'elaborazione del risultato della taratura per definire la funzione caratteristica del termometro tarato, tale elaborazione numerica è affetta da un'incertezza di interpolazione. Questa, nel certificato di taratura deve essere indicata separatamente in quanto non inerente al processo di taratura ma a quello successivo di calcolo.

7.2.1. Termometria a resistenza

Per i termometri a resistenza, l'incertezza composta u_{sens} del sensore in taratura è valutata dalla relazione:

$$u_{sens} = \sqrt{u_{rip}^2 + u_{stab}^2 + u_{ist}^2} \quad [7]$$

dove:

- u_{rip} è il contributo di ripetibilità stimato con lo scarto tipo della media delle n misure consecutive (almeno dieci), calcolabile con la seguente relazione:

$$u_{rip} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad [8]$$

- u_{stab} è il contributo dovuto alla stabilità a breve del sensore, definito come differenza tra la misura iniziale e quella finale a 0 °C opportunamente convertita in temperatura. L'incertezza tipo è calcolata come:

$$u_{stab} / \Omega = \frac{\Delta R_{0^\circ C}}{2\sqrt{3}} \quad [9]$$

Tale incertezza deve essere propagata linearmente alle altre temperature. Esempio, per stimare il contributo di u_{stab} al punto di taratura a 400 °C:

$$u_{stab(400C)} = u_{stab(0C)} \cdot \frac{R(400^{\circ}C)}{R(0^{\circ}C)}$$

- u_{ist} è il contributo dovuto all'effetto d'isteresi. Tale effetto potrebbe essere non trascurabile nei termometri a resistenza, specialmente quando questo è costruito avendo l'elemento sensibile del termometro saldamente legato al supporto ceramico ed è sottoposto a una ampia variazione di temperatura. Per stimare tale contributo si eseguono due misure, alla temperatura al centro del range di taratura, una partendo dalla temperatura massima e l'altra partendo dalla temperatura minima. ΔR_{Tmid} è data dalla differenza tra le due misurazioni e l'incertezza tipo è calcolata come:

$$u_{ist} / \Omega = \frac{\Delta R_{Tmid}}{2\sqrt{3}} \quad [10]$$

Il calcolo di u_{sens} nella taratura di termistori deve essere svolto seguendo il documento [2.3]

7.2.2. Termocoppie

Per le termocoppie l'incertezza composta u_{sens} del sensore in taratura è valutata dalla relazione:

$$u_{sens} = \sqrt{u_{rip}^2 + u_{stab}^2 + u_{hom}^2 + u_{est/comp}^2} \quad [11]$$

In accordo alle indicazioni EA, è necessario rendere esplicita la distinzione tra termocoppie a metallo nobile ed a metallo base.

Per la specifica termocoppia in taratura, devono essere presi in considerazione i seguenti contributi:

- u_{rip} contributo di ripetibilità stimato come lo scarto tipo della media di n misure consecutive;
- u_{stab} è il contributo dovuto alla stabilità del sensore durante la taratura nel caso di termocoppie a metallo base con taratura oltre i 500 °C, definita come differenza tra la misura iniziale e quella finale alla temperatura minima di taratura, dopo aver eseguito la taratura a temperature crescenti, opportunamente convertito in taratura [2.6].

$$u_{stab} / E = \frac{\Delta E_{Tmin}}{2\sqrt{3}} \quad [12]$$

- u_{hom} contributo inerente la non omogeneità dei termoelementi della termocoppia in taratura (stimata come proposto in [2.6]);
- $u_{est/comp}$ è il contributo dovuto all'impiego di cavi di estensione/compensazione [2.16]. Dal certificato di taratura del cavo si ricava la correzione da applicare e la relativa incertezza.

7.2.3. Termometri a dilatazione

Per i termometri a dilatazione, l'incertezza composta u_{sens} del sensore in taratura è valutata dalla relazione:

$$u_{sens} = \sqrt{u_{rip}^2 + u_{stab}^2 + u_{ris}^2} \quad [13]$$

dove:

- u_{rip} contributo di ripetibilità stimato come lo scarto tipo della media di n misure consecutive;
- u_{stab} è il contributo che tiene conto di possibili scostamenti, dovuti ad una non trascurabile stabilità a breve e isteresi, oppure all'effetto di depressione nei termometri a liquido. Tale contributo è stimato misurando la correzione ad una temperatura di riferimento (di solito il punto di fusione del ghiaccio), prima e dopo l'esposizione a temperature lontano dall'ambiente. L'incertezza tipo è calcolata come:

$$u_{stab} = \frac{\Delta t}{\sqrt{3}} \quad [14]$$

- u_{ris} è il contributo di incertezza tipo dovuto alla capacità di risoluzione della misura, normalmente pari a 1 divisione del termometro, che però può essere diminuita in base all'esperienza dell'operatore e ai dispositivi integrati (es. canocchiale, sistema di ingrandimento ottico o digitale). Tale contributo è calcolato considerando una distribuzione di probabilità uniforme, come segue:

$$u_{ris} = \frac{Risoluzione}{2\sqrt{3}} \quad [15]$$

7.2.4. Catene termometriche

Nel caso in cui lo strumento in taratura sia una catena termometrica costituita da indicatore di temperatura connesso a uno o più termometri a resistenza o termocoppie, per il calcolo del contributo d'incertezza dovuto allo specifico strumento in taratura è necessario stimare i contributi d'incertezza per la specifica tipologia di sensore (u_{sens}), a cui aggiungere il contributo dovuto alla risoluzione dell'indicatore (u_{ris}):

$$u_{ris} = \frac{Risoluzione}{2\sqrt{3}} \quad [16]$$

cosicché la relazione [6] diventa:

$$U = 2\sqrt{u_{lab}^2 + u_{sens}^2 + u_{ris}^2} \quad [17]$$

Nel caso in cui non si abbiano informazioni in merito al sensore associato alla catena termometrica in taratura, il contributo di ripetibilità e di stabilità a breve deve sempre essere stimato. Inoltre, sarebbe opportuno effettuare un'indagine preliminare sull'omogeneità e sull'isteresi (nel caso di ampi range di taratura) del sensore in taratura.

Nel caso la catena termometrica sia costituita da un trasmettitore [2.9] abbinato ad un termometro a resistenza o termocoppia, l'incertezza tipo composta sarà calcolata a partire dall'incertezza di taratura della sonda abbinata u_{sens} e dall'incertezza di misura della grandezza d'uscita u_{let} (corrente, tensione):

$$U = 2\sqrt{u_{lab}^2 + u_{sens}^2 + u_{let}^2} \quad [18]$$

dove u_{let} è il contributo di incertezza dello strumento utilizzato per la lettura dell'uscita del trasmettitore, opportunamente convertito in temperatura.

7.3. Valutazione dell'incertezza di interpolazione per termometri a resistenza e termocoppie

L'incertezza di interpolazione deriva dalla dispersione delle misure, che provoca incertezza sulla stima dei coefficienti del polinomio interpolatore.

La stima dell'incertezza tipo del polinomio interpolatore (u_{int}) si ottiene calcolando la radice quadrata della somma in quadratura dei "residui" (M_i), cioè delle differenze, tra i valori misurati e quelli calcolati con il polinomio interpolatore (convertiti entrambi in gradi Celsius), divisa per i gradi di libertà, ovvero:

$$u_{int} = \sqrt{\frac{\sum_i M_i^2}{n - m}} \quad [19]$$

dove: $M_i = \frac{y_{m.i.} - y_{c.i.}}{dy/dt_{c.i.}}$ con:

$y_{m.i.}$: valore misurato al punto i -esimo

$y_{c.i.}$: valore calcolato al punto i -esimo

$dy/dt_{c.i.}$: valore della derivata calcolato al punto i -esimo

n : numero di punti di taratura

m : numero di coefficienti calcolati dal polinomio interpolatore:

- per termoresistenze:

$m = 2$, in quanto sono determinati per via statistica (minimi quadrati) i soli valori stimati dei coefficienti A e B del polinomio per $t \geq 0$ °C, se ne consiglia poi l'estrapolazione, se necessaria, fino a -40 °C.

$m = 3$, per $t < -40$ °C

- per termocoppie

$m = 3$, poiché il polinomio interpolatore è del secondo ordine.

I gradi di libertà del processo di interpolazione sono $n - m$.

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|
| Gradi di libertà | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 100 | ∞ |
| Fattore di copertura | 12.7 | 4.30 | 3.18 | 2.78 | 2.57 | 2.45 | 2.36 | 2.31 | 2.26 | 2.23 | 2.09 | 2.04 | 2.02 | 2.01 | 1.98 | 1.96 |

8. PRESENTAZIONE DEI RISULTATI DI MISURA

La presentazione dei risultati della taratura deve essere conforme al [2.23].

Inoltre, dalla seconda pagina in avanti devono essere riportati:

- i campioni di misura, completi delle informazioni relative ai certificati, che nella taratura in oggetto garantiscono la catena di riferibilità;
- le procedure di taratura impiegate, complete dell'indice di revisione;
- le condizioni di funzionamento dello strumento in taratura (posizione, alimentazione, collegamenti se del caso);
- le condizioni ambientali;
- le condizioni di taratura (mezzo comparatore utilizzato e profondità d'immersione);
- la tabella dei risultati della taratura e delle incertezze ai punti di misura come riportato di seguito.

8.1. Termometri a resistenza

Nel caso di redazione di un certificato di taratura di un termometro a resistenza, in tabella 4 si riporta un esempio di presentazione dei risultati della taratura.

Tabella 4 – Esempio di presentazione dei risultati di taratura di un termometro a resistenza

| Numero punti | Temperatura di riferimento $t_{rif} / ^\circ\text{C}$ | Resistenza misurata R_{mis} / Ω | Resistenza di riferimento R_{rif} / Ω ⁽¹⁾ | Errore $R_{mis} - R_{rif} / \Omega$ | Errore ⁽²⁾ $t_{mis} - t_{rif} / ^\circ\text{C}$ | Incertezza di misura $U / ^\circ\text{C}$ |
|--------------|---|--|---|-------------------------------------|--|---|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |
| 6 | | | | | | |
| 7 | | | | | | |
| 8 | | | | | | |
| 9 | | | | | | |
| 10 | | | | | | |

⁽¹⁾ Calcolata a partire da t_{rif} secondo la norma CEI EN 60751

⁽²⁾ Calcolata a partire dall'errore $R_{mis} - R_{rif}$ dividendo per dR/dT , quest'ultimo calcolato secondo la norma CEI EN 60751

Sul certificato è necessario dichiarare anche le seguenti informazioni:

- se il termometro, in accordo con il cliente, è stato sottoposto a ricottura prima della taratura. In questo caso è necessario riportare una misura prima della ricottura e il ciclo di ricottura a cui il termometro è stato sottoposto;
- il tipo di collegamento utilizzato (a 2, 3, 4 fili);
- il valore della corrente di misura utilizzata (normalmente 1 mA);

- i coefficienti della curva di interpolazione nel campo di taratura e l'incertezza relativa al procedimento di interpolazione, se richiesto;
- la tabulazione dei risultati derivanti dal polinomio interpolatore, se richiesto.

8.2. Termocoppie

Nel caso di redazione di un certificato di taratura di una termocoppia, in tabella 5 si riporta un esempio di presentazione dei risultati della taratura.

Tabella 5 – Esempio di presentazione dei risultati di taratura di una termocoppia

| Numero punti | Temperatura di riferimento $t_{rif} / ^\circ\text{C}$ | fem misurata $E_{mis} / \mu\text{V}$ | fem di riferimento (*) $E_{rif} / \mu\text{V}$ | Errore ⁽¹⁾ $E_{mis} - E_{rif} / \mu\text{V}$ | Errore ⁽²⁾ $t_{mis} - t_{rif} / ^\circ\text{C}$ | Incertezza di misura $U / ^\circ\text{C}$ |
|--------------|---|--|--|---|--|---|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |
| 6 | | | | | | |
| 7 | | | | | | |
| 8 | | | | | | |
| 9 | | | | | | |
| 10 | | | | | | |

⁽¹⁾ Calcolata a partire da t_{rif} secondo la norma CEI EN 60584-1

⁽²⁾ Calcolata a partire dall'errore $E_{mis} - E_{rif}$ dividendo per dE/dt , quest'ultimo calcolato secondo la norma CEI EN 60584-1

Sul certificato è necessario dichiarare anche le seguenti informazioni:

- se la termocoppia, in accordo con il cliente, è stata sottoposta a ricottura prima della taratura. In questo caso è necessario riportare una misura prima della ricottura e il ciclo di ricottura a cui si sottopone la termocoppia;
- se la termocoppia in taratura è stata tarata con il suo cavo di collegamento;
- in alternativa, il cavo di estensione/compensazione usato per il collegamento completo delle informazioni necessarie a garantirne la riferibilità;
- se e come è stata valutata l'omogeneità della termocoppia in taratura;
- i coefficienti della curva di interpolazione nel campo di taratura e l'incertezza relativa al procedimento di interpolazione, se richiesto;
- la tabulazione dei risultati derivanti dal polinomio interpolatore, se richiesto.

8.3. Catena termometrica (caso indicatore con sonda)

Nel caso di redazione di un certificato di taratura di una catena termometrica costituita da indicatore abbinato ad una o più sonde di taratura, in tabella 6 si riporta un esempio di presentazione dei risultati della taratura per ciascuna sonda.

Tabella 6 – Esempio di presentazione dei risultati di taratura di un indicatore di temperatura con sonda

| Numero punti | Temperatura di riferimento $t_{rif} / ^\circ\text{C}$ | Temperatura indicata $t_{mis} / ^\circ\text{C}$ | Errore $t_{mis} - t_{rif} / ^\circ\text{C}$ | Incertezza di misura $U / ^\circ\text{C}$ |
|--------------|---|---|---|---|
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |
| 6 | | | | |
| 7 | | | | |
| 8 | | | | |
| 9 | | | | |
| 10 | | | | |

Sul certificato è necessario dichiarare anche le seguenti informazioni:

- le condizioni di taratura cioè: senza esecuzione di messa a punto o con messa a punto. In quest'ultimo caso i risultati di taratura ottenuti prima e dopo tale operazione devono essere riportati nello stesso certificato;
- il canale dell'indicatore su cui è collegata la sonda in taratura;
- l'eventuale configurazione utilizzata dall'indicatore per eseguire la taratura;
- il tipo di alimentazione (interna o esterna);
- la risoluzione dello strumento in taratura;
- l'identificazione del software, nel caso di impiego di software per la lettura delle misure del dispositivo in taratura.

8.4. Catena termometrica (caso trasmettitore con sonda)

Nel caso di redazione di un certificato di taratura di una catena termometrica costituita da trasmettitore (tensione o corrente) abbinato ad una o più sonde di taratura, in tabella 7 si riporta un esempio di presentazione dei risultati della taratura per ciascuna sonda.

Tabella 7 – Esempio di presentazione dei risultati di taratura di un trasmettitore di temperatura con sonda.

| Numero punti | Temperatura di riferimento $/ ^\circ\text{C}$ | Valore corrispondente $/ \text{V}; \text{mA}$ | Valore misurato $/ \text{V}; \text{mA}$ | Temperatura corrispondente $/ ^\circ\text{C}$ | Errore $t_{mis} - t_{rif} / \%$ | Incertezza di misura $/ ^\circ\text{C}$ |
|--------------|---|---|---|---|---------------------------------|---|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |
| 6 | | | | | | |
| 7 | | | | | | |

8.5. Termometro a dilatazione

Nel caso di redazione di un certificato di taratura di un termometro a dilatazione, in tabella 8 si riporta un esempio di presentazione dei risultati della taratura per ciascuna sonda.

Tabella 8 – Esempio di presentazione dei risultati di taratura di un termometro a dilatazione.

| Numero punti | Temperatura di riferimento $t_{rif} / ^\circ\text{C}$ | Temperatura indicata $t_{mis} / ^\circ\text{C}$ | Errore $t_{mis} - t_{rif} / ^\circ\text{C}$ | Incertezza di misura $U / ^\circ\text{C}$ |
|--------------|--|--|--|--|
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |

Sul certificato è necessario dichiarare anche le seguenti informazioni:

- il tipo di immersione (parziale o totale, per termometri a liquido in vetro);
- per i termometri a liquido a immersione parziale, la temperatura della colonna emergente, per ciascun punto di misura;
- il tipo di montaggio (verticale o orizzontale, per termometri a quadrante);
- la risoluzione dello strumento in taratura (p.e. $\frac{1}{2}$ divisione della scala di misura);
- nel caso in cui di taratura di termometri a dilatazione di liquido con incertezze dell'ordine di qualche centesimo di grado, la pressione dell'ambiente ove si è svolta l'attività di taratura.

ALLEGATO 1 - INFORMATIVO

A titolo di esempio, si riportano di seguito alcuni valori del contributo di incertezza del "miglior dispositivo esistente", u_{BED} per ciascuna tipologia di sensore, che possono essere utilizzati nella stima della U_{CMC} del laboratorio.

Tabella 1. Incertezza tipo u_{BED} per termocoppie a metallo base e metallo nobile

| Temperatura | Incertezza tipo u_{BED} | |
|----------------------|---------------------------|------------------------|
| | TC base | TC nobile |
| da -80 °C a 0 °C | 0,05 °C | 0,15 °C ⁽³⁾ |
| da 0 °C a 200 °C | 0,05 °C | 0,10 °C |
| da 200 °C a 600 °C | 0,10 °C | 0,07 °C |
| da 600 °C a 1100 °C | 0,45 °C | 0,10 °C |
| da 1100 °C a 1300 °C | 0,55 °C | 0,3 °C |
| da 1300 °C a 1500 °C | 1,0 °C ⁽²⁾ | 0,4 °C |

⁽³⁾ limite di temperatura inferiore ridotto a -50 °C come indicato in [2.15]

⁽²⁾ solo per le termocoppie tungsteno/renio

Tabella 2. Incertezza tipo u_{BED} per termometri a resistenza di platino

| Temperatura | Incertezza tipo u_{BED} |
|--------------------|---------------------------|
| a -196 °C | 0,005 °C |
| da -80 °C a 0 °C | 0,003 °C |
| a 0 °C | 0,002 °C |
| da 0 °C a 100 °C | 0,003 °C |
| da 100 °C a 250 °C | 0,005 °C |
| da 250 °C a 550 °C | 0,010 °C |
| da 550 °C a 660 °C | 0,075 °C |

Tabella 3. Incertezza tipo u_{BED} per termistori

| Temperatura | Incertezza tipo u_{BED} |
|-------------------|---------------------------|
| da -50 °C a 90 °C | 0,003 °C |
| da 90 °C a 200 °C | 0,005 °C |