

CARATTERIZZAZIONE TERMICA DI UNA SALA METROLOGICA 3D L'ESEMPIO DI UN UTILIZZATORE INDUSTRIALE

di Giovanni Martelli, Feliciano Biseglia, Renato Marsura

INTRODUZIONE

Le condizioni ambientali di una sala metrologica dipendono dal livello di incertezza del processo di misurazione atteso, dai metodi di misurazione adottati, dalla condizioni di riferimento per le grandezze di influenza dei misurandi e dei campioni o apparecchiature di misurazione impiegate.

Per la misurazione dei prodotti è ben noto che, al variare della temperatura, variano le dimensioni e la geometria degli oggetti secondo leggi fisiche di dilatazione dei corpi che nella pratica quotidiana, per corpi complessi ed articolati e per strutture composite, non seguono quasi mai un andamento lineare¹.

Inoltre, gli MPE (Maximum Permissible Error) riportati nei cataloghi di macchine complesse e con prestazioni elevate, quali una CMM ad esempio, sono verificabili solo in specificate condizioni ambientali.

E' da tenere presente che tra i parametri richiesti dal costruttore di una CMM, oltre alla temperatura di esercizio, devono essere garantite anche le variazioni di tale temperatura, come i gradienti temporali e spaziali, entro limiti prefissati. Quindi, il primo suggerimento da dare a chi si accinge all'acquisto di una CMM² è verificare se esistono le condizioni ambientali alle quali il costruttore garantisce le prestazioni della stessa.

Nasce a questo punto la domanda: come è possibile caratterizzare le condizioni termiche dell'ambiente nel quale ubicare la CMM?

Mentre esistono normative che ci indicano come condurre le verifiche di prestazioni della CMM, citate anche dal costruttore che le indica nel documento in cui definisce gli MPE, non esistono invece indicazioni per come fare a rilevare i gradienti spaziali e temporali di temperatura relativi al volume in cui la CMM deve operare. La recente necessità di ampliare l'ambiente in cui ubicare una nuova CMM ci ha imposto di definire un capitolato in cui descrivere al fornitore della sala metrologica le nostre necessità e le modalità con le quali avremmo verificato i parametri di temperatura a lui richiesti.



Sala Metrologica Magneti Marelli

Purtroppo, tra le normative consultate e la documentazione analizzata, non è stata trovata neppure una istruzione che ci indicasse come procedere. Tuttavia, per analogia con le celle termiche e climatiche, il metodo adottato e di seguito descritto nel presente articolo si ispira alla norma CEI IEC 60068-3-5 [2] che, infatti, è normalmente utilizzata per valutare la mappatura della temperatura delle celle termiche o climatiche.

CARATTERISTICHE E REQUISITI DELL'AMBIENTE OGGETTO DI VERIFICA

Le caratteristiche ed i requisiti della sala metrologica sono descritti in specifici documenti aziendali [3] [4].

Di seguito, si riporta una loro sintesi.

La sala metrologica oggetto di verifica è adibita al controllo dimensionale e geometrico di particolari meccanici con macchina di misura a coordinate, rotondimetro, rugosimetro ed apparecchi a comparazione.

Le dimensioni del locale sono 4,35 m x 13,40 m x 3,70 m, che corrispondono ad un volume di 215 m³.

L'accesso alla sala metrologica avviene tramite un locale, antisala, che isola termicamente la sala metrologica rispetto all'ambiente esterno. Le porte di accesso, verso la sala e verso l'esterno, devono essere congegnate in modo tale sia possibile l'apertura di una sola porta per volta (vedi schema esemplificativo di Fig.1).

¹ Nell'articolo "Effetti termici nella metrologia dimensionale" pubblicato su INARCOS Ingegneri Architetti Costruttori N. 674 - Novembre 2006 da A. Zaffagnini è descritta compiutamente la problematica dell'influenza della Temperatura nella caratterizzazione dimensionale dei prodotti [1].

² Si tratta delle norme della serie ISO 10360 che non si citano puntualmente in quanto ampiamente note ai lettori di questa rivista.

L'antisala deve essere condizionata in modo da assicurare che la temperatura rispetto la sala metrologica non sia maggiore di 1 o 2°C.

Le considerazioni circa il livello di incertezza di misura atteso per la caratterizzazione metrologica dei prodotti, nonché la definizione dei metodi di misurazione applicati in laboratorio, hanno portato alla specificazione di una temperatura di $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$. Inoltre, secondo le specifiche del costruttore della CMM, sono stati fissati limiti sui gradienti spaziali e temporali pari, rispettivamente, a $1^\circ\text{C}/\text{m}$ e $1^\circ\text{C}/\text{h}$.

Poiché la CMM occupa solo una parte dell'area del laboratorio e poiché le misurazioni effettuate con le altre apparecchiature sono meno critiche dal punto di vista degli effetti termici (misure di forma e rugosità, misure a comparazione), la caratterizzazione termica e la verifica del rispetto del limite posto sulla temperatura hanno riguardato solamente l'area in cui opera la CMM.

Per caratterizzare completamente un locale da adibire a Sala Metrologica, ci sarebbero altre variabili di influenza da considerare come la pressione atmosferica, l'umidità relativa, la pulizia dell'aria, la velocità dell'aria, le vibrazioni al suolo, l'illuminazione, gli eventuali disturbi elettromagnetici; questi, però, non sono oggetto di trattazione nel presente articolo³.

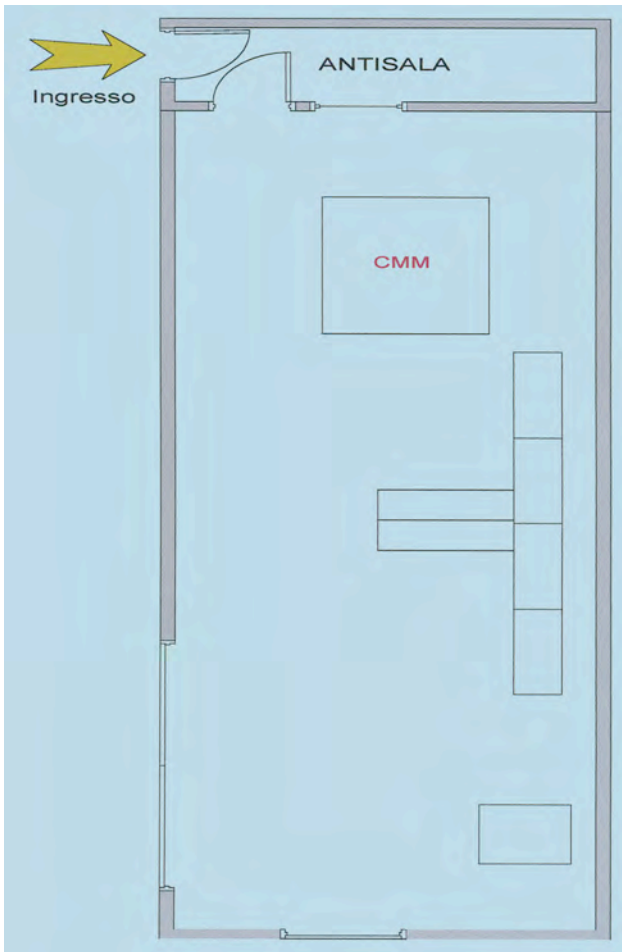


Fig. 1 – Planimetria sala

APPARECCHIATURE ED ALLESTIMENTO SPERIMENTALE

I rilievi delle temperature sono stati effettuati tramite 22 termometri a resistenza Pt100-4 con guaina metallica, \varnothing 8x80 mm, collegati tramite 3 multiplexer ad un acquirettore dati.

I sensori sono stati disposti su appositi sostegni a distanze pari a 1 metro uno dall'altro come indicato nella Fig. 2; inoltre, vengono disposti un sensore a 50 cm dal soffitto ed un sensore nella zona occupata dall'operatore della CMM.

La riferibilità delle misure è garantita dall'utilizzo di strumentazione debitamente tarata e corredata di certificati di taratura conservati presso l'archivio dell'unità Metrologia dell'Azienda.

L'acquirettore dati, dotato di opportuno software, è stato così settato:

- misura di resistenza a 4 fili
- fondo scala 1 k Ω
- risoluzione 1 m Ω
- intervallo di scansione 60"

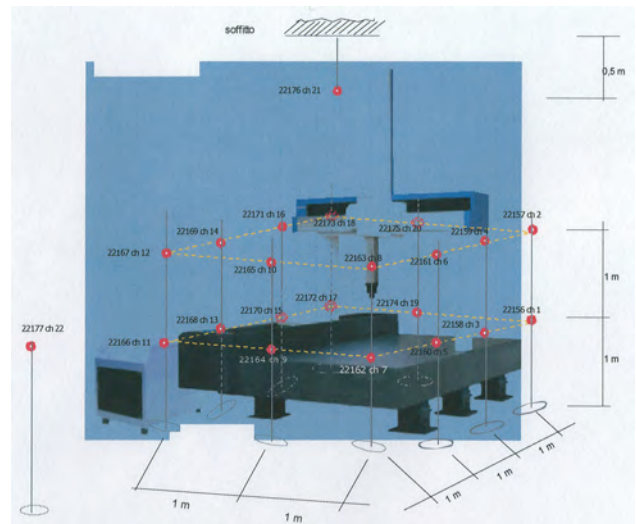


Fig. 2 – CMM e disposizione sonde

ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DATI

I rilievi delle temperature all'interno della sala metrologica sono iniziati solamente dopo un periodo di tempo necessario affinché siano raggiunte condizioni termiche stabili e comunque non prima di 5 giorni (120 ore) di condizionamento ininterrotto.

Inoltre, sono stati eseguiti in presenza di tutta la strumentazione prevista per l'esecuzione delle operazioni di taratura e misurazione, debitamente alimentata, con tutte le lampade di illuminazione accese, con PC accesi ma mantenuti lontani dai sensori di temperatura e con la presenza dei 2 o 3 addetti alle misurazioni a seconda del turno di lavoro.

I rilevamenti sono perdurati ininterrottamente per 4 giorni (96 ore) a partire da venerdì 23 settembre 2005 fino a martedì 27 settembre 2005. In tal modo, si è compreso nella prova anche l'intervallo di tempo corrispondente al fine settimana non lavorativo.

I risultati delle rilevazioni devono essere registrati e presentati con un documento che indichi:

³ Per approfondimenti vedere UNI 9052:1987 Criteri base per le procedure di taratura dimensionale [5].

- data inizio preconditionamento
- data d'inizio prova
- data di fine prova
- cubatura della sala
- planimetria della sala
- disposizione della strumentazione
- layout dei sensori di temperatura
- matricola o codice dei sensori utilizzati
- strumentazione utilizzata per la misura e la registrazione della temperatura ed umidità
- tipo e quantità della strumentazione adibita alla taratura presente in sala durante la prova
- numero degli operatori presenti in sala durante la prova
- tabelle e/o grafici dei risultati delle misurazioni di temperatura
- relazione che giustifichi l'idoneità o l'insufficienza all'impiego della sala quale laboratorio di metrologia.

I dati scaricati sono stati importati su un foglio di calcolo excel per eseguire la conversione da ohm a gradi Celsius e se ne è ricavato il grafico riportato in Fig. 3.

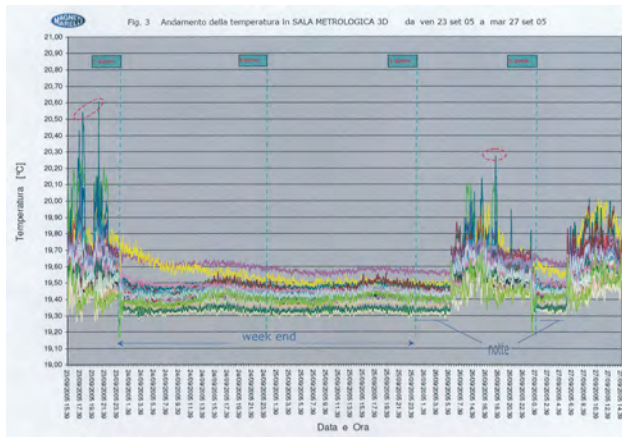


Fig. 3 - Grafico

traccia	RTD	T. Media (°C)	T. max (°C)	T. min (°C)	Δ (°C) (T. max-T. min)	scostamento (°C) (T. Media-T. Ref)
	RTD 22166 oh1	19,63	19,86	19,52	0,34	-0,37
	RTD 22167 oh2	19,50	19,84	19,34	0,50	-0,50
	RTD 22168 oh3	19,62	20,02	19,42	0,60	-0,38
	RTD 22169 oh4	19,50	19,91	19,32	0,59	-0,50
	RTD 22170 oh5	19,52	20,24	19,34	0,90	-0,48
	RTD 22171 oh6	19,48	20,17	19,25	0,92	-0,52
	RTD 22172 oh7	19,57	20,60	19,34	1,26	-0,43
	RTD 22173 oh8	19,54	19,97	19,31	0,66	-0,46
	RTD 22174 oh9	19,52	19,90	19,38	0,52	-0,48
	RTD 22175 oh10	19,44	19,73	19,20	0,53	-0,56
	RTD 22186 oh11	19,41	19,66	19,24	0,42	-0,59
	RTD 22187 oh12	19,43	19,71	19,24	0,47	-0,57
	RTD 22188 oh13	19,35	19,61	19,19	0,42	-0,65
	RTD 22189 oh14	19,44	19,73	19,27	0,46	-0,56
	RTD 22170 oh15	19,44	19,70	19,28	0,42	-0,56
	RTD 22171 oh16	19,49	19,79	19,30	0,49	-0,51
	RTD 22172 oh17	19,44	19,68	19,26	0,42	-0,56
	RTD 22173 oh18	19,42	19,67	19,24	0,43	-0,58
	RTD 22174 oh19	19,51	19,74	19,42	0,32	-0,49
	RTD 22175 oh20	19,49	19,78	19,36	0,42	-0,51
	RTD 22176 oh21	19,50	19,81	19,28	0,53	-0,50
	RTD 22177 oh22	19,42	19,70	19,16	0,54	-0,58

Fig. 4 – Misure e temperatura da rapporto metrologico Magneti Marelli

ANALISI DEI RISULTATI ED OSSERVAZIONI

Analizzando il grafico ricavato emerge che tutti i valori registrati risultano entro i limiti fissati:

- temperatura di riferimento (20 ± 1)°C,
- 1°C/m (gradiente spaziale),
- 1°C/h (rateo temporale).

Quindi la sala metrologica risulta idonea all'uso previsto.

Inoltre, il grafico dimostra quanto segue:

- Nella parte iniziale sono stati registrati dal sensore su ch7 vari picchi tra cui un massimo di 20,60°C registrato alle ore 20.40 di venerdì 23, probabilmente dovuto alla vicinanza dell'operatore della CMM. La durata dei picchi è così breve che non avrà nessuna influenza sui risultati delle misure dell'oggetto in prova; la brevità del picco evidenzia un buon comportamento del sistema di condizionamento.
- Si nota che durante tutto il fine settimana la temperatura rimane piuttosto stabile, lo stesso accade di notte quando non viene svolta alcuna attività lavorativa.
- A partire dalle 06.00 circa di lunedì 26 la temperatura comincia nuovamente a fluttuare in coincidenza con inizio del 1° turno di lavoro; tale condizione si manifesta fino alle 24.00, ora in cui tutto il personale del 2° turno termina l'attività lavorativa.
- Dalle 24.00 di martedì 27, si ripete nuovamente il ciclo di stabilità notturna alternato con le fluttuazioni del periodo lavorativo.

CONCLUSIONI

Il metodo sopra descritto vuole essere un suggerimento di come sia possibile oggettivare i parametri di temperatura utili per chi vuole utilizzare una CMM entro le specifiche richieste dal costruttore della stessa.

Ricordiamo che la Magneti Marelli Powertrain S.p.A. è un fornitore di componenti Automotive e che i suoi Clienti richiedono di dimostrare che le CMM siano capaci di misurare le caratteristiche dei prodotti con specifici studi di capacità [6]. Tali studi possono dare risultati assai difficili da interpretare in ambienti con temperatura non controllata e questo è sicuramente un motivo in più per rilevarla e quindi conoscerne la sua dispersione.

BIBLIOGRAFIA

- UNI EN ISO 1:2003 Specifiche geometriche dei prodotti (GPS) - Temperatura normale di riferimento per la specifica e verifica geometrica dei prodotti.
- [1] Alberto Zaffagnini - Effetti termici nella metrologia dimensionale - INARCOS Ingegneri Architetti Costruttori N. 674 - Novembre 2006.
- [2] CEI IEC 60068-3-5 Environmental Testing - Part 3-5: Supporting documentation and guidance - Confirmation of the performance of temperature chambers.
- [3] Magneti Marelli Powertrain - Capitolato Accettazione Sala Metrologica.
- [4] Magneti Marelli Powertrain - Relazione Tecnica Laboratorio Metrologico - 2006-09-29.
- [5] UNI 9052:1987 Criteri base per le procedure di taratura dimensionale.
- [6] Roberto Bertozzi, Giovanni Martelli, Alberto Zaffagnini - Validazione del Processo di Misurazione con CMM in applicazioni del comparto automotive - Probing N.13 - Giugno 2007.

STIMA DELLA INCERTEZZA DI MISURA DELLA TEMPERATURA AMBIENTALE

a cura di Giovanni Martelli

La relazione che segue è indirizzata al calcolo della stima dell'incertezza di misura da associare ai valori di temperatura rilevati da ogni singolo termometro. Per convenzione sarà indicata con la lettera *u* (minuscola) l'incertezza tipo, mentre con la lettera *U* (maiuscola) si indicherà l'incertezza estesa con fattore di copertura K=2.

Per la determinazione dell'incertezza sono stati individuati i seguenti contributi:

- accuratezza (MPE) del misuratore di resistenza
- incertezza di taratura del misuratore di resistenza
- incertezza del processo di interpolazione indicato dal certificato di taratura SIT
- incertezza della temperatura con cui è stata tarata la termoresistenza indicata dal certificato SIT
- accuratezza del calcolo delle temperature della cartella di calcolo ST037_6S-XLS

Contributo da attribuire alla accuratezza (MPE) del misuratore di resistenza (*u_{act}*)

La misura della temperatura è eseguita misurando la resistenza della Pt100, la quale costituisce l'elemento sensibile del termometro, che è definita, come dichiarato nel certificato di taratura, per temperature ≥ -40°C, dalla relazione: $R_t = R_0 (1 + A_t + B_t^2)$

dove: $R_0 = 100 \Omega$, $A = 3,9 \times 10^{-3}$ e $B = -5,8 \times 10^{-7}$ sono i valori standard adottati per il calcolo.

L'accuratezza della misura di resistenza dichiarata dal costruttore del misuratore, per un periodo di 1 anno, è pari a: ±(0,01% lett + 0,001% fs) la quale, per una lettura di 108 Ω (20°C) ed un fs di 1000 Ω del misuratore, vale: 0,011+0,01 = 0,021 Ω.

Derivando R_t rispetto a t , per $t = 20^\circ\text{C}$, si ottiene il coefficiente di sensibilità espresso in [Ω °C-1], ossia: $\frac{dR_t}{dt} = R_0(A + 2B_t) = 0,39 \Omega \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

da cui si ricava il contributo di incertezza dovuto all'accuratezza del misuratore (MPE), espresso in °gradi Celsius, applicando la relazione: $U_a = \frac{0,021}{0,39} = 0,054^\circ\text{C}$ la cui distribuzione è da considerare di tipo rettangolare. Da ciò si ricava lo scarto tipo che risulta essere:

$$u_{act} = \frac{0,054}{\sqrt{3}} = 0,031^\circ\text{C}.$$

Contributo da attribuire alla incertezza di taratura del misuratore di resistenza (*u_{itt}*)

Il certificato di taratura dichiara che la misura è stata eseguita con un TUR ≥ 3:1, essendo il TUR (Test Uncertainty Ratio) il rapporto tra massimo errore strumentale ammesso ed incertezza di taratura. Prendendo come scarto tipo il valore calcolato come u_{act} , l'incertezza

tipo di taratura sarà: $u_{itt} = \frac{0,031^\circ\text{C}}{3} = 0,01^\circ\text{C}.$

Contributo da attribuire alla incertezza del processo di interpolazione della termoresistenza Pt100 (*u_{apt100}*)

La misura della temperatura è eseguita utilizzando una termoresistenza il cui certificato di taratura fornisce i coefficienti A,B,C ed il valore R_0 personalizzati. Immettendo tali dati nel foglio di calcolo si ottiene il risultato di ridurre l'errore di accuratezza della termoresistenza al solo errore del procedimento di interpolazione. La storia di precedenti tarature assegnano a tale incertezza, con

fattore di copertura K=2, un valore ≤ ±0,05°C da cui si ricava lo scarto tipo: $u_{apt100} = \frac{0,05^\circ\text{C}}{2} = 0,025^\circ\text{C}.$

Contributo da attribuire alla incertezza della temperatura con cui è stata tarata la termoresistenza Pt100 (*u_{itpt100}*)

I certificati indicano che la temperatura di taratura è conosciuta con una incertezza di ± 0,1°C (fino a 600°C), con un coefficiente di

copertura K=2, per cui lo scarto tipo risulta essere: $u_{itpt100} = \frac{0,1^\circ\text{C}}{2} = 0,05^\circ\text{C}.$

Contributo da attribuire all' algoritmo di calcolo della temperatura (temperatura verso resistenza) (*u_c*)

L'algoritmo adottato per il calcolo della temperatura introduce un errore, dovuto alle approssimazioni, il cui valore massimo stimato è di ± 0,05°C. L'errore rappresenta la semi ampiezza di una distribuzione di tipo rettangolare per cui, si stabilisce il valore dello scarto tipo

con la relazione: $u_c = \frac{0,05^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 0,029^\circ\text{C}.$

Incetenza tipo globale del termometro per la misura della temperatura (*u_{gtc}*)

Il contributo globale del termometro è rappresentato dalla somma quadratica degli scarti tipo, non ritenendo ci possano essere problemi di correlazione tra i singoli contributi, ossia:

$$u_{gtc} = \sqrt{(u_{act})^2 + (u_{itt})^2 + (u_{apt100})^2 + (u_{itpt100})^2 + (u_c)^2} =$$

$$u_{gtc} = \sqrt{(0,031)^2 + (0,01)^2 + (0,025)^2 + (0,050)^2 + (0,029)^2} = 0,07^\circ\text{C}$$

Incetenza estesa della procedura (livello di confidenza 95%) (*U_{gct}*)

L'incetenza totale, per un livello di confidenza del 95%, è data moltiplicando per 2 lo scarto tipo per cui avremo che l'incetenza della misura della temperatura di ogni singolo punto della cubatura della cella è:

$$U_{gct} = 2 u_{gtc} = 2 \times 0,07 = 0,14^\circ\text{C}$$

Poiché il rapporto tra la semiampiezza della tolleranza sulla temperatura (1°C) e l'incetenza di misura della stessa è maggiore di 7, si può ritenere che le catene termometriche utilizzate siano ampiamente idonee per misurare i gradienti temporali e spaziali per le quali sono state impiegate.