



Agenti fisici e salute nei luoghi di lavoro

IL TEMPO DI MISURA DEI PARAMETRI TERMOIGROMETRICI NEGLI ACCERTAMENTI TECNICI DI MICROCLIMA.

Gianluca Gambino, Daniele Meda, Alessandro Merlino, Gabriele Quadrio

CeSNIR srl, Villasanta (MB)

1 – INTRODUZIONE

Con questo lavoro si intende intervenire sul delicato aspetto dei tempi di misurazione dei parametri necessari a condurre le verifiche sul comfort o sullo stress termico dei lavoratori. La durata di ogni misurazione dei parametri termo-igrometrici quali temperatura, irraggiamento e umidità, deve includere un tempo di adattamento delle sonde che è di diversi minuti e che, per quelle con la maggior inerzia termica, può arrivare a circa 20 minuti. Questa attesa è necessaria affinché tutte le sonde si portino all'equilibrio termico con l'ambiente che caratterizza ogni specifico punto di misura.

Ogni campagna di misurazioni è pertanto limitata da una frequenza di campionamento molto bassa, dell'ordine delle 2 misurazioni all'ora.

Oltre a fare chiarezza su questo aspetto, talvolta trascurato dai valutatori con il rischio di importanti errori nella quantificazione dell'esposizione, si intende proporre una procedura che consente di ridurre tali tempi di attesa.

Partendo dall'espressione analitica che descrive l'evoluzione temporale della risposta di un sensore alle variazioni della grandezza misurata, il lavoro approda ad una tecnica per determinare il valore finale di questa, avvantaggiandosi di interpolazioni eseguite sui valori restituiti dalla sonda nei primi minuti del tempo di adattamento, quindi prima che questa si sia portata all'equilibrio termico con l'ambiente.

Sono infine restituiti gli esiti di alcune prove condotte in camera climatica e sul campo.

2 – IL TEMPO DI RISPOSTA DI UN SENSORE

Come anticipato nell'introduzione, la determinazione del valore numerico di ognuno dei parametri oggetto di misurazione nel contesto di un accertamento sul microclima, può avvenire solo dopo aver atteso che le diverse sonde utilizzate si siano portate all'equilibrio termico con l'ambiente in cui sono inserite. Sonde differenti impiegano tempi diversi per raggiungere l'equilibrio termico e il tempo di attesa prima della misurazione sarà evidentemente pari al tempo di adattamento più lungo tra quelli di tutte le sonde impiegate.

Considerata la lentezza nella risposta di questo tipo di strumenti, le misurazioni sono da condurre in condizioni ambientali stazionarie o quasi-stazionarie, procedendo, eventualmente, a più misurazioni in momenti diversi per cogliere le variazioni nelle condizioni termiche. Le variazioni a cui si deve comunque far fronte sono quelle che si presentano tra un punto e l'altro di misura ed è pertanto all'inizio di ogni nuova misurazione che si deve tenere conto del tempo di acclimatazione della strumentazione, prima di acquisire il valore delle grandezze da misurare. Nella figura sotto si può apprezzare il tipico andamento dell'acclimatazione dei diversi sensori di temperatura utilizzati in un rilievo microclimatico. È risaputo che il globotermometro, utilizzato per la stima della temperatura media radiante, richiede un'attesa lunga, dell'ordine dei 20 minuti. Da notare che anche i termoigrometri capacitivi hanno comunque tempi di risposta lunghi, mentre lo psicrometro è molto più rapido.

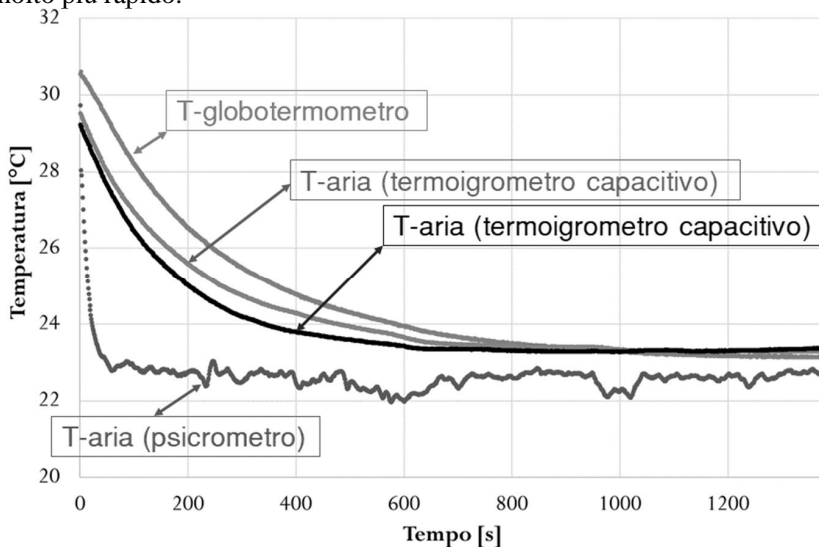


Figura 1. Andamento temporale dell'output di diversi sensori di temperatura, durante un normale rilievo sul campo.

L'individuazione di una corretta tempistica di misura è necessaria nell'ottica di minimizzare l'incertezza sulla stima del parametro fisico di interesse. Nel caso in cui le grandezze di interesse abbiano variazioni lievi nell'intervallo di misura, l'ambiente termico sotto esame può essere considerato un sistema stazionario. In questo contesto il raggiungimento dell'equilibrio termico con l'ambiente da parte delle sonde è dettato principalmente dall'inerzia termica di ogni sensore. Un sensore immerso in un ambiente con caratteristiche differenti rispetto al precedente, si porterà in equilibrio secondo la legge matematica (INAIL, 2018):

$$X(t) = X_1 + \Delta X \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad 1$$

Nell'equazione soprastante X è la grandezza fisica sotto esame, sia essa la temperatura dell'aria, l'umidità, la temperatura media radiante, o altro. Con X_1 si indica il valore segnato dal sensore nel momento in cui esso è inserito nel nuovo ambiente, ΔX è la variazione della grandezza fisica tra l'attuale punto di misura e il precedente e τ è la costante di tempo del sensore, la cui definizione è ripresa dalla norma tecnica UNI EN ISO 7726:2002 *Ergonomia degli ambienti termici - Strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche*. **Costante di tempo di un sensore (τ):** tempo necessario per l'output del sensore, in risposta a un cambiamento immediato nella quantità ambientale misurata, per raggiungere il 63% della sua variazione verso il valore finale, senza considerare il fenomeno di overshooting, ovvero la tendenza del segnale a oscillare attorno al valore finale a causa dell'inerzia del sistema.

Un altro parametro importante per la caratterizzazione temporale dei sensori microclimatici è il **tempo di risposta (T_x)**, definito come il tempo oltre il quale la quantità misurata può essere considerata sufficientemente vicina al valore vero della grandezza fisica oggetto di misura. In condizioni di stazionarietà, questo parametro è direttamente calcolabile a partire dalla costante di tempo, mediante la formula in equazione 1. Si assume come riferimento il tempo di risposta T_{90} , pari a circa 2.3 volte la costante di tempo. I produttori di strumentazione tecnica generalmente forniscono questo valore nei data sheet della strumentazione.

Nel contesto microclimatico la costante di tempo di un sensore, e quindi il tempo di risposta, non dipende solo dalle caratteristiche del sensore, come ci si potrebbe aspettare, ma anche dalle condizioni dell'ambiente di misura. Per fare un esempio, nella stima della temperatura dell'aria l'acclimatamento del termometro dipende anche dalla velocità dell'aria nel punto di misura, infatti il sensore si porta all'equilibrio termico più velocemente se immerso in un flusso d'aria importante, grazie a un maggior scambio di calore per

convezione, rispetto a un ambiente caratterizzato da una minor movimentazione dell'aria.

3 – INCERTEZZA DI MISURA E DURATA DEL RILIEVO

Per quanto scritto sopra, la durata del rilievo microclimatico è strettamente correlata con la precisione della misura.

La norma tecnica UNI EN ISO 7726, oltre a definire i requisiti minimi che deve rispettare la strumentazione impiegata per la misurazione delle grandezze fisiche che caratterizzano un ambiente, fornisce informazioni sui metodi da utilizzare per questo tipo di rilevazioni. Per quanto riguarda le rilevazioni di temperatura, la norma tecnica indica precisamente il tempo di attesa necessario per una misura di temperatura dell'aria e per una di temperatura media radiante attraverso l'utilizzo di un globotermometro di diametro pari a 15 cm. Questi tempi sono riportati in tabella 1.

Tabella 1: tempi di attesa necessari prima di condurre una misurazione (UNI EN ISO 7726:2002)

Grandezza fisica	Tempo di attesa
temperatura dell'aria	$1.5 \cdot T_{90}$
temperatura di globo	20 – 30 minuti

Si ricorda che il tempo di risposta T_{90} del termometro dovrebbe essere indicato direttamente dal produttore del sensore.

Queste indicazioni sono riportate negli allegati informativi A e B della norma. Secondo questo approccio, l'attesa prima dell'esecuzione di una misura dei parametri microclimatici all'interno di un ambiente non potrebbe essere inferiore a 20 minuti.

Le linee guida per la valutazione del microclima del coordinamento tecnico per la sicurezza nei luoghi di lavoro delle Regioni e delle Province autonome indicano che la distanza temporale fra due misure è dettata dal sensore più lento nell'acclimatamento, ovvero il globotermometro. Nel documento è suggerito un tempo di attesa di almeno 15 minuti e soltanto se il campo di radiazione prevedibile nell'ambiente è prossimo a quello dell'ambiente oggetto della precedente misura, è possibile l'esecuzione di una nuova misura a 6-8 minuti dalla precedente.

Nel caso non si abbiano indicazioni sul tempo di risposta della strumentazione, il documento INAIL del 2018 fornisce un approccio diverso e meno rigido rispetto a quello della norma tecnica UNI EN ISO 7726, applicando la formula in Equazione 1 al sensore che possiede la maggior inerzia termica, il globotermometro.

d-A2019

La proposta consiste nel valutare l'attesa necessaria all'acclimatamento della sonda caso per caso, stimando il tempo necessario al sensore per raggiungere un livello di precisione pari a ± 2 °C. Questo approccio rende il tempo di attesa variabile in base alle condizioni ambientali, infatti segue il principio fisico per cui a una maggior escursione di temperatura tra 2 punti di misura, corrisponde una maggiore durata dell'acclimatamento.

INAIL avverte che una limitazione importante all'applicazione di questo metodo è intrinseca nel metodo stesso: la differenza di temperatura è infatti la grandezza oggetto di misura, pertanto si possono solo effettuare delle stime qualitative da inserire nella formula e avere un'indicazione sulla durata dell'attesa necessaria. In fase di progettazione della campagna di rilievi il metodo non può fornire quantitativamente i tempi di attesa necessari ai vari rilievi pianificati.

Un livello di precisione di ± 2 °C deve essere inoltre considerato come il minimo obiettivo da raggiungere e noi riteniamo consigliabile puntare a una migliore accuratezza, soprattutto nel caso di accertamenti di comfort termico. Secondo la nostra esperienza, infatti, una differenza tra temperatura media radiante e temperatura dell'aria pari a 1.2 °C è già significativa per sostenere che il contributo radiante è rilevante e che quindi un'azione di mitigazione dovrebbe agire sulla riduzione degli apporti di calore che raggiungono il soggetto per irraggiamento e non sull'aumento del raffrescamento per convezione. Raggiungere una migliore accuratezza nella misurazione delle temperature dell'aria e di globotermometro è pertanto funzionale ad una efficace ricerca delle cause di un eventuale discomfort globale da caldo.

Inoltre anche l'incidenza del valore della temperatura del globotermometro sul PMV risultante rende desiderabile una maggiore accuratezza. Un esempio numerico può rendere più chiara questa osservazione: supponiamo che nella postazione di lavoro indagata la temperatura di globo reale sia di 25 °C, questo vorrebbe dire che i valori accettabili sarebbero compresi nell'intervallo 23 °C – 27 °C. Effettuando una simulazione con i parametri fissi di temperatura dell'aria di 25 °C, umidità relativa pari a 50%, velocità dell'aria pari a 0.1 m/s, isolamento termico del vestiario e metabolismo tipici del lavoro d'ufficio, lo scostamento massimo tra gli esiti di PMV sarebbe pari a 0.72. Si riportano due esempi numerici in tabella 2.

Nelle principali norme tecniche non ci sono indicazioni su come governare l'incertezza della misura. L'unico riferimento al momento disponibile è ancora una volta la norma tecnica UNI EN ISO 7726, che fissa i requisiti di accuratezza strumentale per la misura delle grandezze fisiche fondamentali.

Questi requisiti sono riferiti alla strumentazione, non alla misura. Questo vuol dire che, nel calcolo dell'incertezza di misura, andrebbero tenuti in considerazione sia il contributo relativo all'accuratezza del sensore che quello dovuto alla precisione della misura connessa con la durata dell'attesa. Per le considerazioni successive useremo comunque i limiti indicati nella norma

7726, i quali sono riportati in Tabella 3 per le misure di temperatura dell'aria, temperatura media radiante e temperatura di globotermometro.

Tabella 2: esempi dell'incidenza delle variazioni della temperatura di globotermometro Tg sul valore dell'indice PMV

Icl	Met	Rh	Va	Ta	Tg	PMV
0.7 clo	1.2 Met	50 %	0.1 m/s	25 °C	23 °C	-0.10
					25 °C	0.24
					27 °C	0.62
				23 °C	21 °C	-0.66
					23 °C	-0.32
					25 °C	0.06

L'accuratezza strumentale per l'ultima grandezza fisica in tabella 3 è stata derivata attraverso la formula di propagazione degli errori arrestata al primo ordine.

Da notare che la stessa norma fornisce valori diversi a seconda dell'utilizzo della strumentazione, infatti per le valutazioni di stress termico i limiti di accuratezza sono ben più alti di quelli definiti per le valutazioni di comfort termico.

Tabella 3: Requisiti di accuratezza strumentale secondo la norma UNI EN ISO 7726

Grandezza fisica	Accuratezza strumentale		
	Tipologia	Comfort	Stress
temperatura dell'aria	Richiesta	± 0.5 °C	$\pm 0.5 / 3.3$ °C
	Desiderabile	± 0.2 °C	$\pm 0.25 / 1.65$ °C
temperatura media radiante	Richiesta	± 2 °C	$\pm 5 / 13$ °C
	Desiderabile	± 0.2 °C	$\pm 0.5 / 4.5$ °C
Temperatura di globo	Richiesta	± 1.7 °C	$\pm 4.3 / 11.7$ °C
	Desiderabile	± 0.2 °C	$\pm 0.4 / 4$ °C

Per ogni grandezza fisica e per ogni tipologia di valutazione, sono presenti un'accuratezza accettabile e una desiderabile. Secondo la nostra esperienza, sarebbe auspicabile che l'incertezza della misura dovuta al tempo di risposta della sonda non fosse superiore al limite desiderabile. Nel caso del comfort termico, sarebbe quindi necessario ricercare una precisione di misura pari a 0.2 °C. Con questo obiettivo, utilizzando l'approccio descritto nel documento INAIL, è possibile calcolare il tempo di attesa necessario per ogni rilievo in funzione della differenza di temperatura di globotermometro tra un punto di misura e il successivo, come riportato negli esempi in tabella 4.

Tabella 4: tempi di attesa in funzione della differenza di temperatura di globotermoetro T_g

ΔT_g [°C]	Precisione [°C]	Tempo di attesa [min]
2	0.2	20
5	0.2	28
10	0.2	34

I risultati indicano che per differenze di temperatura superiori ai 2 °C, il tempo di attesa necessario per avere una precisione strumentale inferiore a 0.2 °C dovrebbe essere ben superiore ai 20 minuti. L'entità di questi scostamenti è sperimentabile in uffici dello stesso stabile, magari esposti verso punti cardinali diversi. I tempi di attesa indicati dalla norma tecnica per il globotermometro, pari a 20-30 minuti, risultano quindi confrontabili con quelli proposti nella tabella sopra.

Viste le considerazioni fatte sopra, la corretta procedura di campionamento consente non più di 2 misure all'ora, dove all'interno di questo intervallo di tempo la misura effettiva occupa 2-3 minuti per punto. Infatti, se assumiamo che lo spostamento della strumentazione da una postazione a quella successiva possa richiedere circa 3 minuti per rilievo, la durata di un rilievo compreso il posizionamento della sonda è di 26 minuti. Pertanto si può affermare che in un'indagine microclimatica, circa tre quarti del tempo totale dovrebbero essere impiegati per l'attesa dell'acclimatamento delle sonde.

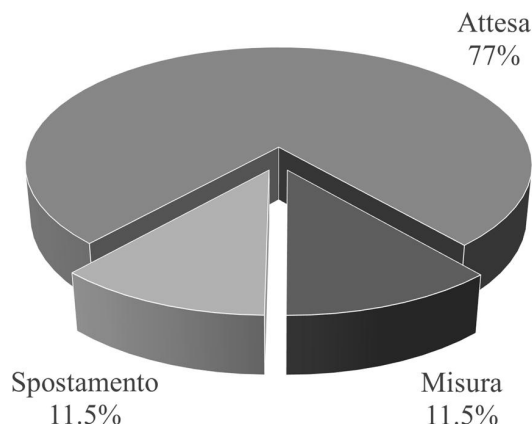


Figura 2. Suddivisione del tempo complessivo di accertamento del microclima nelle tre fasi di attesa, spostamento e misura.

Nei casi in cui l'accertamento richiede alcune decine di misurazioni, la campagna di misure può protrarsi per diversi giorni. Questo vincolo apre la strada al problema della confrontabilità degli esiti delle valutazioni in punti diversi, in quanto un cambiamento sensibile nelle condizioni metereologiche può incidere anche sull'andamento delle grandezze termoisometriche nei punti di misura.

4 – UN APPROCCIO ALTERNATIVO

Entrambi i metodi per la determinazione di un corretto tempo di attesa, sia questo tempo fisso per tutti i rilievi o variabile, utilizzano lo stesso approccio, per cui la durata dell'acclimatamento delle sonde equivale a un tempo di attesa improduttivo ai fini dell'indagine microclimatica. Il tecnico deve aspettare un tempo corretto affinché i valori dei parametri termoisometrici rilevati dai sensori si siano stabilizzati e, a quel punto, può iniziare il campionamento dei dati che utilizzerà per portare a termine la sua valutazione, sia essa di stress o di comfort termico.

In questo contributo si propone un metodo alternativo, basato su un approccio diverso da quello standard appena visto.

L'idea di base del metodo alternativo proposto è la seguente: capitalizzare le misure raccolte nel corso del tempo di adattamento, nobilitando quel che prima era solo attesa.

A questo scopo, ricavata la curva che meglio descrive l'evolvere di ogni singola grandezza oggetto di misura, è possibile calcolare il valore a cui la stessa tende asintoticamente, ovvero il valore atteso al raggiungimento dell'equilibrio termico tra sonda e ambiente.

La curva di acclimatamento del sensore in funzione del tempo è descritta dall'equazione 1, in cui, per una maggior chiarezza, è esplicitato il valore a cui tende asintoticamente il sistema (X_2).

$$X(t) = X_1 + (X_2 - X_1) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad 2$$

Tramite tecniche di fitting dei dati, disponibili in fogli di calcolo o in librerie dei più comuni ambienti di sviluppo, è possibile interpolare i dati raccolti con la funzione in eq. 2 attraverso i parametri liberi X_1 , X_2 , τ . La stima della grandezza termoisometrica da considerare per la valutazione microclimatica è rappresentata dal valore di X_2 .

A titolo esemplificativo si riporta in figura 3 un grafico che rappresenta l'acclimatamento di un globotermometro nel corso di un rilievo della durata di 30 minuti (linea continua). La curva tratteggiata rappresenta la funzione che interpola i dati, i cui parametri liberi sono stati calcolati utilizzando la porzione

del rilievo compresa tra il 100mo e l'800mo secondo (area evidenziata nel grafico).

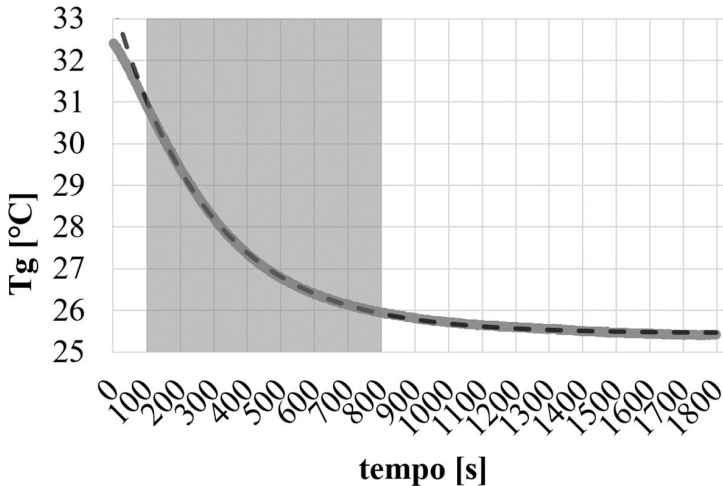


Figura 3. Andamento temporale di un rilievo di temperatura di globo e curva che approssima tale andamento (linea tratteggiata) attraverso l'interpolazione dei dati compresi nella regione evidenziata.

La misura rappresentata in figura 3, come le altre pubblicate nel presente contributo, è stata pensata ed eseguita all'interno di un progetto mirato allo sviluppo di un metodo basato sul nuovo approccio. Le rilevazioni sono state eseguite con strumentazione LSI Lastem (acquisitore dati M-Log e relative sonde) sia nella sede di Ce.S.N.I.R. srl che nella camera climatica presente nei laboratori LSI di Settala.

Gli esiti del calcolo dei parametri sono riportati in tabella 5, ognuno con il relativo errore standard asintotico. Questo errore è restituito dal software opensource Gnuplot, utilizzato per l'interpolazione, e fornisce un'indicazione qualitativa sulla bontà dell'accordo tra l'andamento temporale dei dati e della curva risultante dalla procedura di fitting.

Tabella 5: Valori finali dei parametri del fit con relativo errore asintotico e intervallo di interpolazione ($t_1 \div t_2$)

t_1	t_2	T_{g1} [°C]	ΔT_{g1} [°C]	T_{g2} [°C]	ΔT_{g2} [°C]	τ [s]	$\Delta\tau$ [s]
100 s	800 s	33.38	0.02	25.45	0.02	283 s	1.3 s

Se in termini visivi l'accordo appare sostanzialmente perfetto, nella tabella 6 si può apprezzare quantitativamente la bontà del fit. La differenza tra la media

aritmetica dei dati raccolti negli ultimi 3 minuti del rilievo e il valore del parametro T_{g2} ricavato tramite fitting è pari a 4 centesimi di grado centigrado.

Tabella 6: Confronto tra media calcolata sugli ultimi 3 minuti del rilievo, esito del fit e media calcolata a partire dal T_{90} risultante dal fit

	Media su 3 minuti finali, da $t_1=1620$ s a $t_2=1800$ s	Con procedura di Fitting	Media da $t_1=660$ s a $t_2=840$ s (da T_{90} per 3 minuti)
T_{g2}	25.41 °C	25.45 °C	26.04 °C
Differenza tra media finale e fit	0.04 °C	Differenza tra media al minuto 11 e fit	0.59 °C

Da questo esempio si possono trarre anche delle considerazioni sul tempo di risposta del sensore: l'interpolazione per la costante di tempo restituisce un valore di 283 secondi, quindi il T_{90} è pari a circa 11 minuti. L'acclimatamento è quindi più veloce rispetto al dato teorico dichiarato dal produttore, che fornisce un tempo di risposta di 20 minuti. Con un'attesa di 11 minuti e un rilievo successivo di 3 minuti, la stima della temperatura di globo avrebbe avuto un valore più alto di circa 0.6°C rispetto a quella risultante dalla procedura di interpolazione eseguita sui primi 15 minuti. Quindi a parità di tempo speso nella postazione di misura, con l'applicazione del secondo approccio descritto in questo contributo è possibile migliorare la stima di circa 0.6 °C rispetto all'approccio migliorativo descritto nel documento INAIL.

Il secondo esempio che riportiamo è riferito a un rilievo eseguito ad hoc per confrontare le risposte di due globotermometri identici tra loro, posizionati sullo stesso cavalletto a distanza ravvicinata e alla stessa altezza da terra. La strumentazione è stata collocata in un ambiente caldo e, non appena è stata spostata in un ambiente climatizzato, è stato avviato il campionamento dei dati.

Nel grafico in figura 4 sono riportati gli andamenti dell'acclimatamento dei due sensori, le linee tratteggiate rappresentano le curve di interpolazione calcolate sempre nell'intervallo 100 – 800 s. L'ingrandimento dell'ultima parte del grafico permette di apprezzare l'adattamento delle due curve ai due set di dati. Il passo di campionamento è pari a 3 secondi, ma per una maggiore chiarezza del grafico, nell'ingrandimento è riportato un dato ogni 30 secondi.

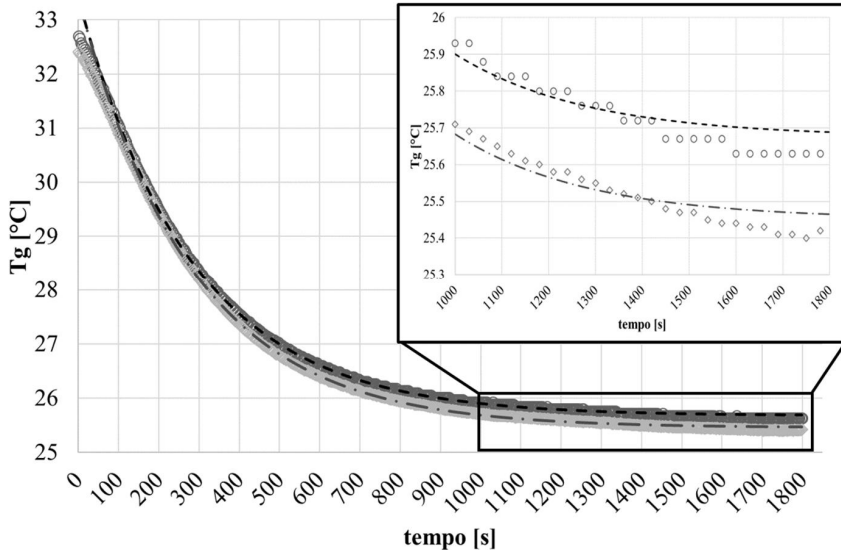


Figura 4. Andamento temporale di due rilievi di temperatura di globo e curve derivanti dalla procedura di fitting (linee tratteggiate), con ingrandimento sulla regione compresa tra 1000 e 1800 s.

Gli esiti riportati in tabella 7 indicano un accordo sorprendente per quanto riguarda i parametri ΔT_{g1} e τ , con riferimento alla differenza tra le due previsioni della temperatura di globo T_{g2} , questa è pari a 0.22 °C.

Tabella 7: Valori finali dei parametri dei fit con relativi errori asintotici e intervallo di interpolazione ($t_1 \div t_2$) per i due sensori utilizzati

	t_1	t_2	T_{g1} [°C]	ΔT_{g1} [°C]	T_{g2} [°C]	ΔT_{g2} [°C]	τ [s]	$\Delta\tau$ [s]
Globo 1	100 s	800 s	33.38	0.02	25.45	0.02	283	1.3
Globo 2	100 s	800 s	33.38	0.01	25.67	0.01	283	0.8
Δ_{1-2}	--	--	0.00	--	0.22	--	0	--

Tale discrepanza è dovuta all'accuratezza della strumentazione, infatti le medie eseguite sugli ultimi 3 minuti del rilievo hanno uno scostamento identico, come visibile in tabella 8. L'accordo tra le previsioni è dell'ordine dei 4 centesimi di grado coi rispettivi set di dati. Per il rilievo sotto esame, si può affermare che l'incertezza sulla stima della temperatura di globo sia pari a oltre 5 volte l'errore risultante dalla stima attraverso interpolazione dei dati.

Tabella 8: Confronto tra medie calcolate sugli ultimi 3 minuti dei rilievi, esiti dei fit e differenze

	Media su 3 minuti finali, da $t_1=1620$ s a $t_2=1800$ s	Con procedura di Fitting	Differenza tra media finale e fit
T_{g2} globo 1	25.41 °C	25.45 °C	0.04 °C
T_{g2} globo 2	25.63 °C	25.67 °C	0.04 °C
Δ_{1-2}	0.22 °C	0.22 °C	

Gli esempi sopra discussi indicano che in un ambiente stazionario, il secondo approccio può rendere più veloce la procedura di misura con un errore sulla stima sostanzialmente trascurabile. Inoltre, questo metodo può essere utilizzato per diverse grandezze termometriche, come temperatura dell'aria e umidità relativa, ovvero per tutti quei sensori che hanno un tempo di risposta non immediato.

I risultati esposti sono stati raggiunti attraverso l'utilizzo del software Gnuplot, preferiti a quelli ottenuti con il foglio di previsione del pacchetto Office Excel per una maggior versatilità e un miglior controllo dello strumento di interpolazione dimostrate dal primo dei due programmi. Il software implementa l'algoritmo di Levenberg–Marquardt, una tecnica standard per la risoluzione di problemi ai minimi quadrati non lineari.

Non sempre l'esecuzione dell'algoritmo ha esito positivo: in alcuni casi può succedere che la previsione non si adatti bene al set di dati, nei casi peggiori invece l'algoritmo potrebbe fallire e restituire un messaggio di errore. Per ridurre al minimo queste eventualità, i valori iniziali dei parametri X_1 e X_2 usati per iniziare il ciclo iterativo di fitting, sono stati posti rispettivamente uguali al primo e all'ultimo dei dati collezionati. Il valore iniziale della costante di tempo iniziale è stato posto pari a 500 secondi, l'equivalente di un tempo di risposta di circa 20 minuti. Un'ulteriore accortezza riguarda gli spazi in cui possono variare i 3 parametri liberi, infatti per aumentare le probabilità che l'esito sia positivo conviene vincolare l'intervallo di variabilità. Al momento, si è scelto di vincolare i parametri X_1 , X_2 ad un intervallo pari al campo di misura del sensore, mentre la costante di tempo può variare nel semiasse positivo del campo reale.

5 – TEMPISTICHE DI MISURA COL METODO DEL FITTING

Nel precedente paragrafo abbiamo mostrato le potenzialità del metodo confrontando gli esiti derivanti dall'applicazione dei due approcci su rilievi di

lunga durata. Nel presente si discutono alcune osservazioni sulla durata minima del rilievo al fine di raggiungere una buona stima della grandezza termoisometrica sotto esame.

In analogia all'approccio standard, anche per l'uso della tecnica del fitting la durata minima dei rilievi dipende dall'ampiezza dell'intervallo che la strumentazione deve coprire durante l'acclimatamento e dallo scostamento dalle condizioni di stazionarietà del sistema. Sulla base della nostra esperienza, in queste condizioni, la durata del singolo rilievo può essere ridotta del 50% rispetto a quella definita dal metodo standard (20 ÷ 30 minuti di attesa + 3 minuti di campionamento).

Fissata la durata del rilievo, la scelta dell'intervallo di dati su cui effettuare l'interpolazione, ovvero la determinazione del numero di dati iniziali da scartare, risulta decisivo nella riduzione dell'errore sulla stima. In effetti non tutti i campioni sono utili alla minimizzazione dell'errore sulla stima. Come mostrato nella figura 5, nei primi minuti di misura l'evoluzione della grandezza segue un andamento diverso da quello teorico (decadimento esponenziale). Una volta superata questa fase, l'output del sensore restituisce valori in linea con le previsioni analitiche. Per questo motivo i primi campioni, più che essere inutili, costituiscono una vera e propria perturbazione del calcolo e se utilizzati, a parità di incertezza del risultato, dovrà essere maggiore il numero totale di campioni su cui estenderne il calcolo e quindi maggiore la durata di ogni misura. Risulta pertanto importante scartare alcuni dei campioni iniziali, ma con quale criterio?

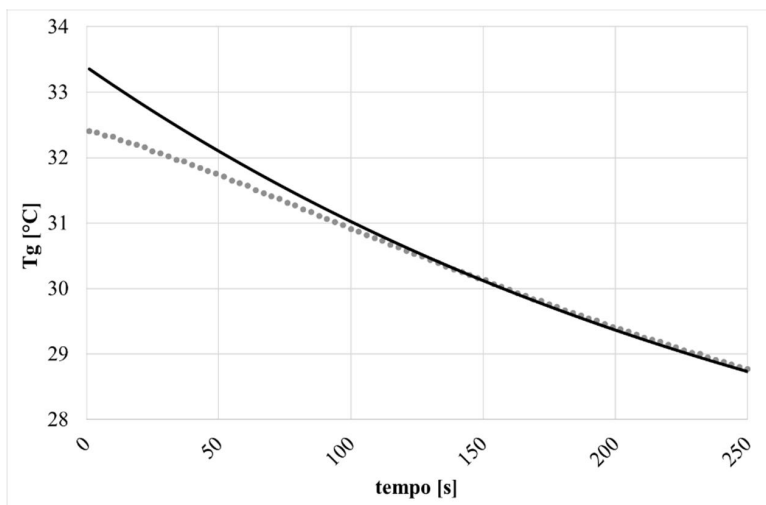


Figura 5. Confronto tra risposta temporale di un globotermometro nei primi minuti del rilievo (rappresentazione per punti) e approssimazione analitica tramite fitting (linea continua).

d-A2019

Non siamo certi che si possa definire una regola generale che permetta di scartare un numero fisso di punti iniziali per ogni rilievo sottoposto alla procedura di interpolazione o che si riesca a determinare una relazione matematica tra il numero di dati da scartare e alcuni parametri quali la durata complessiva del rilievo o l'escursione tra valore iniziale e valore finale della grandezza sotto osservazione. Nella pratica, ad oggi, abbiamo provveduto con delle routine che restituiscono una serie di grafici costruiti su set di campioni diversi per punto iniziale e medesimo punto finale del fit, scegliendo visivamente, nei casi dubbi, il miglior intervallo di interpolazione.

Nella figura 6 sono mostrati gli esiti delle interpolazioni eseguite su diversi intervalli di dati dello stesso rilievo.

Gli esiti che hanno in comune il numero di dati iniziali scartati e che differiscono tra loro per numero di campioni utilizzati nell'interpolazione sono collegati con una linea. Nel grafico sono rappresentati i risultati riferiti a intervalli che partono dall'istante iniziale (nella figura indicati dalla linea denominata $t_1=1s$), quelli ottenuti scartando il primo minuto ($t_1=61s$) e così via, fino ad arrivare a non considerare i primi 5 minuti ($t_1=301s$). Il grafico indica che, all'aumentare della durata della misura, tutti i fit convergono a valori vicini alla media eseguita sugli ultimi 3 minuti del rilievo (dal 20° minuto fino al 23°), in figura rappresentata dalla linea continua stazionaria. Gli esiti che ricadono nella banda evidenziata hanno uno scostamento inferiore a 0.2 °C rispetto alla media. Da notare che il rilievo entra in questa regione dopo 16 minuti dal posizionamento della strumentazione nel nuovo punto di misura, quindi un tempo di attesa consono secondo l'approccio standard sarebbe stato non inferiore a questa durata.

Per il rilievo in questione, quasi tutte le curve derivanti da approssimazione analitica si attestano su valori accettabili a partire dall'undicesimo minuto. L'unica eccezione è rappresentata dalla linea relativa ai fit che escludono i primi 5 minuti di misura, che converge verso il suo valore limite ma con un andamento non monotono.

Gli esiti migliori sono quelli ottenuti con l'esclusione dei primi 3 o 4 minuti del rilievo (nel grafico sono rispettivamente rappresentati da quadrati e triangoli), infatti nel primo caso l'adattamento è buono già dopo 8 minuti totali di rilievo, nel secondo addirittura dal settimo minuto in poi.

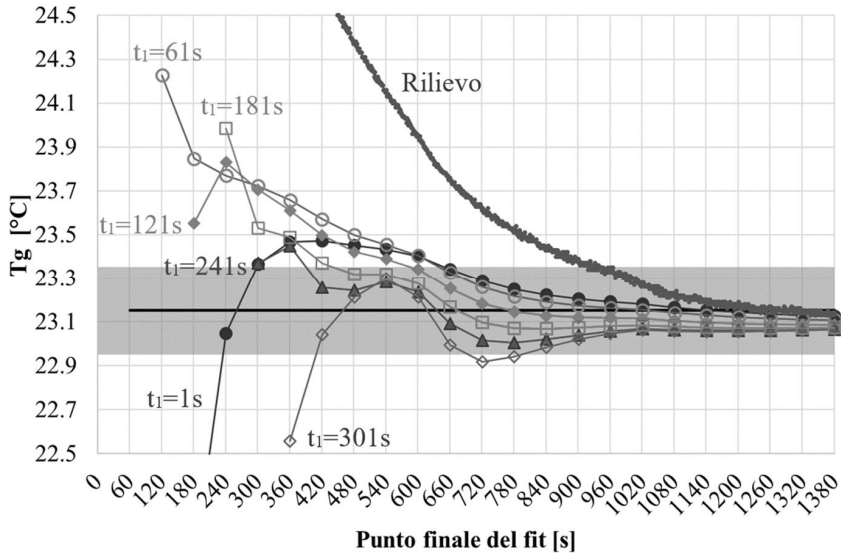


Figura 6. Esiti delle interpolazioni eseguite sui dati di un rilievo, al variare dell'intervallo su cui è applicata la procedura. È riportata anche la media sugli ultimi 3 minuti del rilievo (linea continua stazionaria) e la banda di accettabilità dell'esito, quantificata in ± 0.2 °C.

La tabella 9 riassume i dati mostrati nel grafico, dove t_1 indica l'istante iniziale del fit e t_2 quello finale. Le celle della tabella con sfondo grigio evidenziano gli esiti che hanno uno scostamento superiore a 0.2 °C rispetto alla media sui 3 minuti finali del rilievo, pari a 23.15 °C.

Tabella 9: Esiti delle interpolazioni eseguite sui dati del rilievo, al variare dell'intervallo su cui è applicata la procedura.

t_2 [s]	$t_1 = 1$ s T_{g2} [°C]	$t_1 = 61$ s T_{g2} [°C]	$t_1 = 121$ s T_{g2} [°C]	$t_1 = 181$ s T_{g2} [°C]	$t_1 = 241$ s T_{g2} [°C]	$t_1 = 301$ s T_{g2} [°C]
61	-27752.24	--	--	--	--	--
121	12.41	24.23	--	--	--	--
181	22.00	23.85	23.55	--	--	--
241	23.05	23.77	23.83	23.98	--	--
301	23.36	23.72	23.71	23.53	23.37	--
361	23.47	23.66	23.61	23.49	23.45	22.56
421	23.47	23.57	23.50	23.37	23.26	23.04
481	23.45	23.50	23.42	23.32	23.24	23.21
541	23.43	23.45	23.39	23.32	23.28	23.30

t_2 [s]	$t_1 = 1$ s T_{g2} [°C]	$t_1 = 61$ s T_{g2} [°C]	$t_1 = 121$ s T_{g2} [°C]	$t_1 = 181$ s T_{g2} [°C]	$t_1 = 241$ s T_{g2} [°C]	$t_1 = 301$ s T_{g2} [°C]
601	23.40	23.40	23.34	23.27	23.23	23.21
661	23.34	23.33	23.25	23.17	23.09	22.99
721	23.29	23.26	23.18	23.10	23.02	22.92
781	23.25	23.22	23.15	23.07	23.01	22.94
841	23.22	23.19	23.13	23.07	23.02	22.98
901	23.20	23.17	23.12	23.07	23.04	23.02
961	23.19	23.16	23.12	23.08	23.06	23.05
1021	23.18	23.15	23.11	23.08	23.07	23.06
1081	23.17	23.14	23.11	23.08	23.06	23.06
1141	23.15	23.13	23.10	23.07	23.06	23.06
1201	23.14	23.12	23.09	23.07	23.06	23.05
1261	23.14	23.11	23.09	23.07	23.06	23.06
1321	23.13	23.11	23.09	23.07	23.06	23.06
1381	23.12	23.11	23.09	23.07	23.07	23.06

6 – TEMPISTICHE DELL'INDAGINE, UN CASO PRATICO

In chiusura citiamo quanto abbiamo sperimentato nel corso di un accertamento composto da numerosissime misurazioni nell'estate 2019, soffermandoci solo sugli aspetti concernenti la tempistica.

A fronte della necessità di compiere circa 120 misurazioni, il tempo teorico da dedicare ai soli accertamenti sarebbe stato di 60 ore, 7.5 giorni/uomo. Questa è stata la prima occasione in cui abbiamo sperimentato il metodo di lavoro appena illustrato, con l'aspettativa di ridurre il tempo teorico di indagine a circa 4 giorni/uomo di lavoro. Il dato interessante è che i giorni/uomo lavorativi sono stati alla fine 8. Per un impianto complesso qual era quello oggetto di queste misurazioni, bisogna infatti tenere conto di una discreta quantità di tempo che si aggiunge al tempo teorico di accertamento e rappresentata, ad esempio, da:

- lunghi spostamenti,
- tempi di attesa perché ci siano le opportune condizioni di misura (quelle più rappresentative dell'esposizione reale più intensa),
- tempi di attesa per parziali indisponibilità del personale aziendale,
- fermi impianto,
- ripetizioni di misure in condizioni ritenute più significative delle precedenti (o desiderate dai lavoratori, piuttosto che dalla direzione aziendale).

The logo features a stylized 'd' with horizontal lines above it, followed by a hyphen and a bold 'A', and the year '2019' in a large, bold, sans-serif font.

In definitiva, dimezzare il tempo correlato alle misure vere e proprie ha permesso di eseguire in un tempo comunque ragionevole gli accertamenti che altrimenti si sarebbero potuti protrarre per tempi incompatibili con le disponibilità del nostro personale e di quello dell'azienda cliente.

7 – CONCLUSIONI

Con questo lavoro abbiamo voluto approfondire il tema relativo alle tempistiche che governano le rilevazioni microclimatiche, attraverso il riesame di quanto proposto dalla letteratura più autorevole e la proposta di una tecnica di analisi dati che consente di accorciare i tempi di attesa per l'adattamento delle sonde.

L'approccio standard alla problematica del tempo di acclimatamento dei sensori prevede che il campionamento sia eseguito una volta che la strumentazione ha raggiunto l'equilibrio termico con l'ambiente in cui è inserita. L'esito del rilievo sarà quindi composto dalla media eseguita sui dati collezionati dopo questo tempo di attesa. L'approccio da noi sviluppato propone di utilizzare i dati raccolti durante l'acclimatamento delle sonde per la determinazione del valore da misurare, rendendo così produttivo tutto il tempo trascorso in una postazione di misura. Il presente lavoro dimostra anche che con un'oculata scelta dell'intervallo di misura, è possibile ridurre i tempi del 50% rispetto all'approccio standard, con una perdita in precisione trascurabile.

Il metodo sviluppato è già stato testato nel corso di un accertamento reale e ha permesso di controllare il tempo totale dedicato all'indagine strumentale, compensando il tempo richiesto per gestire gli imprevisti che normalmente occorrono in contesti produttivi.

La messa a punto del metodo richiede tuttavia ulteriori validazioni e approfondimenti. Questi concernono principalmente la scelta degli estremi dell'intervallo di interpolazione, tema che coinvolge sia la questione relativa alla durata complessiva del rilievo, sia il problema legato allo scostamento dall'andamento teorico per i primi dati del rilievo. Una volta conclusa l'esplorazione di questa tematica, sarà possibile quantificare l'errore reale sui risultati ottenuti con questa metodica. Al momento la procedura restituisce l'errore standard asintotico, indicazione solo qualitativa del buon adattamento della curva al set di dati.

Un altro tema degno di attenzione è il campo di applicabilità di questo metodo in termini di escursione tra valore iniziale e finale della grandezza sotto esame e di scostamento dell'evoluzione temporale dalle condizioni di stazionarietà. Uno sviluppo auspicabile è, infine, il coinvolgimento dei produttori di strumentazione tecnica al fine di implementare a bordo della strumentazione il metodo proposto. Questo passo permetterebbe da un lato di utilizzare le tecniche di interpolazione per la previsione in tempo reale dei valori corretti e

del relativo livello di affidabilità, dall'altro potrebbe dare indicazioni utili sull'effettiva stazionarietà della grandezza oggetto di misura.

8 – BIBLIOGRAFIA

[1] UNI EN ISO 7726:2002 *Ergonomia degli ambienti termici – Strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche*

[2] UNI EN ISO 7730:2006 *Ergonomia degli ambienti termici – Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale*

[3] UNI CEI 70098-3:2016 *Incertezza di misura - Parte 3: Guida all'espressione dell'incertezza di misura*

[4] Coordinamento Tecnico per la sicurezza nei luoghi di lavoro delle Regioni e delle Province autonome in collaborazione con ISPESL (2006-06) *Microclima, aerazione e illuminazione nei luoghi di lavoro*

[5] INAIL (2018-07) *La valutazione del microclima*

[6] T. Williams, C. Kelley, E. A. Merritt & others (2018-11) *Gnuplot 5.2 – An interactive plotting program*

[7] M. I. A. Lourakis (2005) *A brief description of the Levenberg-Larquardt algorithm implemented by levmar*