



Rilevazione temperatura corporea e procedure di contenimento del contagio: considerazioni fondamentali

Il 4 maggio segna per l'Italia l'inizio della cosiddetta Fase 2, con la quale un numero progressivo di attività, uffici ed aziende riaprirà le proprie sedi, attuando una serie di procedure e servendosi di dispositivi con i quali minimizzare la possibilità di ulteriore diffusione del contagio.

Tra queste procedure, una consisterà nel rilevamento della temperatura corporea degli addetti in sede, basata sull'utilizzo di tecniche di termografia infrarossa (IR), che non richiede contatto con la superficie di rilevamento.

Considerando che nelle prescrizioni del protocollo non vengono indicate le caratteristiche minime di precisione degli strumenti da utilizzare per la rilevazione di tale temperatura, e nemmeno la tolleranza di misura, in questo articolo si forniscono alcuni elementi di valutazione, sperando possano essere utili a coloro che, confrontandosi con la riapertura, vorrebbero prendere decisioni su questa possibilità di controllo, anche interfacciandosi con le proposte che i fornitori di questi sistemi mettono loro a disposizione.

La pratica del rilevamento di temperatura corporea a distanza su flussi di persone non è nuova: ad esempio, già durante il periodo della SARS/Aviaria, nel 2004¹, ci furono spinte a svilupparne la disciplina. Premesso che gli strumenti IR per misura di temperatura corporea possono essere usati sia in modalità *stand alone* sia connessi a catene HW e SW di differenti caratteristiche e complessità, qui ci limiteremo a parlare degli strumenti di misura, che sostanzialmente sono riconducibili a due tipologie: il **pirometro** e la **termocamera**. Accenneremo anche ad un particolare tipo di termometro clinico, che tecnicamente non è un pirometro IR bensì una **termopila**.

Pirometro e termocamera: differenze funzionali

Tra un pirometro e una termocamera, la prima differenza funzionale è che una termocamera misura contemporaneamente decine o centinaia di migliaia di punti, mentre un pirometro ne misura uno solo e costituito da un'area più estesa. Quindi, la misura accurata di un punto con il pirometro può richiedere prossimità e conseguenti problemi di sicurezza dell'operatore, che la termocamera non mette in gioco.

La termocamera identifica infatti automaticamente, anche a distanza, il punto più caldo dell'inquadratura, mentre con il pirometro è l'operatore che deve sapere esattamente dove puntare, e non è detto che scelga il punto più caldo. Per chiarimento, il punto migliore per una misura IR della temperatura corporea non è la fronte, bensì intorno al canale lacrimale, tra occhio e naso! D'altronde, la termocamera sceglierebbe automaticamente questa zona, a patto che chi viene inquadrato si tolga gli occhiali...

Data la caratterizzazione di un campo di temperatura anziché di un valore puntuale, la termocamera potrebbe teoricamente testare più persone contemporaneamente, a differenza del pirometro. Alla messa in pratica, è comunque necessario verificare che il SW della termocamera lavori correttamente a questo scopo.

¹ Subito dopo il picco della SARS, uno dei due autori si trovava in Cina, a gestire la costruzione di un nuovo stabilimento italiano e vedeva applicare queste misure in arrivo e partenza dall'aeroporto di Shanghai, dove a tutti i passeggeri si misurava la temperatura corporea con una termocamera (con il timore piuttosto serpeggiante di vedersi ricoverare in isolamento in un ospedale cinese...).



Figura 1 (sx): esempio di pirometro IR; Figura 2 (dx): esempio tascabile di termocamera.

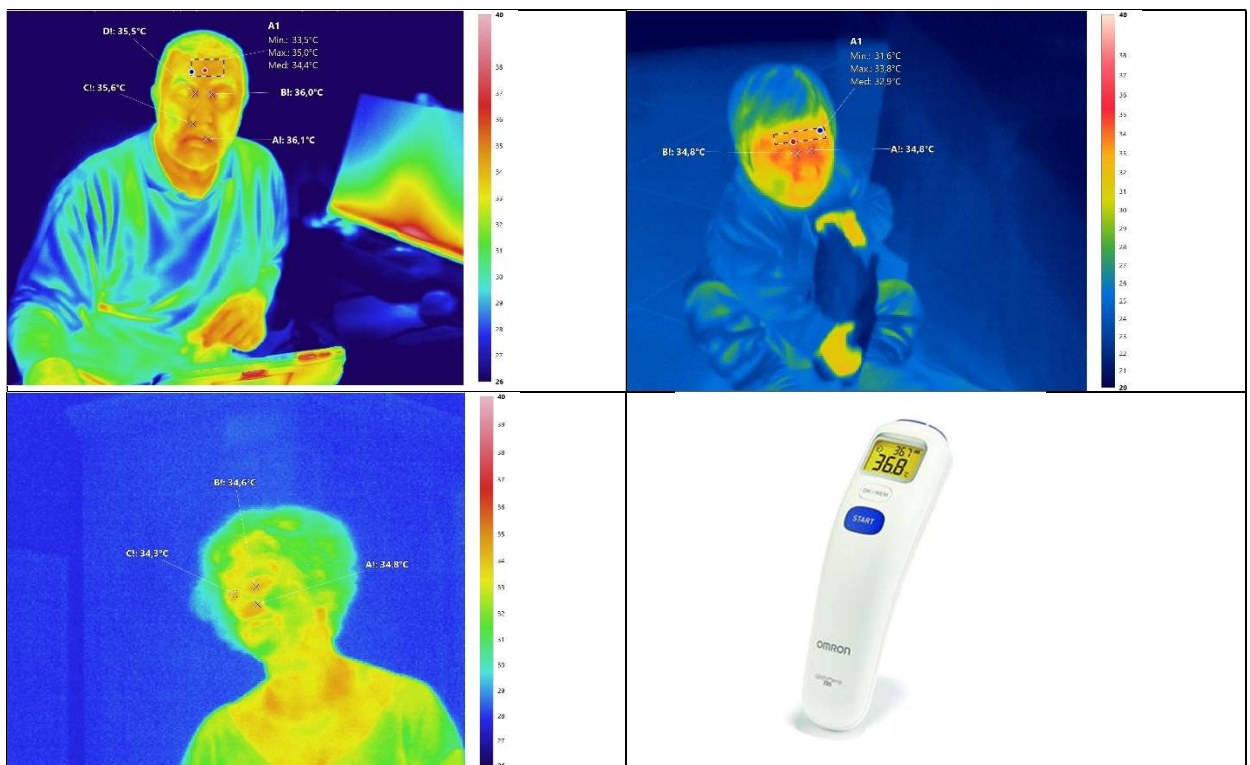


Figure 3 - 4 - 5: esempi di mappatura delle temperature corporee tramite termocamera; si notino alcuni valori puntuali in evidenza, in particolare in prossimità dei canali lacrimali;

Figura 6 (basso a dx): termometro clinico. Il modello mostrato è basato su un sensore a termopila, ma vi sono anche pirometri ad infrarossi specifici per la rilevazione di temperatura corporea.



Quindi, almeno in linea di massima e tenendo conto dei costi, il pirometro si presta a piccole realtà e accessi meno frequenti, mentre flussi di maggior consistenza possono far optare per una termocamera. Alcune altre considerazioni funzionali, riguardanti i termometri clinici, verranno riprese più avanti.

Misure e termografia IR: alcuni richiami

Agli aspetti funzionali di base, è necessario affiancare qualche richiamo sulle prestazioni degli strumenti e sulla teoria delle misure, anche perché le specifiche contenute nelle schede tecniche possono lasciare il varco a più di un'ambiguità, di cui daremo esempio.

Tra i dati tecnici di un pirometro c'è il **cono di misura**. Come abbiamo visto, il pirometro restituisce una misura puntuale; questa è di fatto la temperatura media su un'area finita. Un tipico cono di misura di 12:1 significa che, tenendo il pirometro a 12 cm di distanza, si otterrà la temperatura media di un'area circolare di 1 cm di diametro; a 1m, quello strumento rileverà un'area circolare con 8.25 cm di diametro. In genere, viene anche dichiarato il range della distanza di utilizzo (ad esempio 5-15 cm) entro il quale in genere lo strumento garantisce le prestazioni indicate. Di queste prestazioni vogliamo focalizzarne due: la precisione e l'accuratezza²:

- la **precisione** della misura riguarda la sua **ripetibilità** a pari condizioni, o l'errore **casuale**. È la deviazione standard dei valori rilevati rispetto alla media degli stessi, nel caso si ripetesse la misura con lo strumento un numero di volte infinito;
- la media sopra nominata non è però necessariamente il **valore vero** della grandezza. Lo strumento ha un suo **errore sistematico, o bias**, e la qualità che indica il bias è l'**accuratezza**.

Meno critico sicuramente il concetto di **risoluzione**, che altro non è che la minima distinzione di valore che lo strumento è in grado di fornire alla lettura, in virtù della suddivisione della sua scala.

Un pirometro potrebbe tipicamente essere corredato di una scheda coi seguenti dati:

- Accuratezza $\pm 0,3^\circ$ sul corpo umano
- Distanza di utilizzo 5-15 cm
- Emissività 0,95
- Tempo di risposta 500ms
- Ripetibilità $\pm 1\%$ o $\pm 1^\circ\text{C}$
- Risoluzione $0,1^\circ\text{C}$

² Per qualche maggior dettaglio su precisione e accuratezza, presentati in modo estremamente sintetico nel testo, qui riportiamo testualmente dal sito dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare:

"I termini precisione e accuratezza sono messi in relazione con gli errori casuali e sistematici. Una misura è tanto più precisa quanto più i singoli valori misurati in condizioni di ripetibilità si concentrano intorno alla media della serie di misure effettuate. Il concetto di precisione è qualitativo. La variabilità dei risultati viene quantificata, come di consueto, nella deviazione standard σ .

Ma questa di per sé non è atta a quantificare la precisione della misura secondo il significato usuale del termine di "qualità della misura". Ad esempio, una deviazione standard di 1 mm rappresenta ottima o pessima precisione a seconda che si stiano misurando lunghezze della decina di metri o inferiori al centimetro. Si preferisce quantificare la precisione con il modulo del coefficiente di variazione (cioè σ diviso il modulo della media delle misure), in genere espresso in percentuale. Una deviazione standard di 1 mm su una misura di 10 cm corrisponde ad una precisione dell'1%. Si presti attenzione al fatto che nell'uso corrente "maggiore" è la precisione "minore" è il numero che la indica.

L'accuratezza esprime invece l'assenza di errori sistematici nella misura: una misura è tanto più accurata quanto più la media delle misure si approssima al valore vero della grandezza. Anche l'accuratezza è spesso espressa come rapporto fra l'errore sistematico e il valore della grandezza."



Una termocamera invece ha, negli strumenti più diffusi, una precisione del $\pm 2\%$ o $\pm 2^\circ\text{C}$; pochi modelli più sofisticati scendono a $\pm 1^\circ\text{C}$, e limitatamente al campo di misura che stiamo esaminando. Una termocamera di quest'ultimo livello, più elevato, con risoluzione di 640×480 pixel, esegue circa 300.000 misure di temperatura simultanee (una per pixel), ripetute 30 volte al secondo; a distanza di 1 m la dimensione misurata dal pixel è dell'ordine di 1 mm; a 10 m di 1 cm: si noti che l'area per pixel a 10 m è simile a quella dell'unico punto del pirometro a 12 cm di distanza.

Termometri specifici per la misura di temperatura corporea

Esistono strumenti appositamente pensati per la misura di temperatura corporea, che possiamo definire **termometri clinici**: lo strumento mostrato in Figura 6 è di principio una **termopila**, basata su più termocoppie collegate in serie; offre prestazioni adeguate nel range della temperatura corporea ($\pm 0,2^\circ\text{C}$ tra 36°C e 42°C), ma che decadono drasticamente al di fuori di esso; il suo principio di funzionamento richiede applicazione a distanza molto ridotta (1-3 cm), che può introdurre problemi di sicurezza dell'operatore.

Tra gli strumenti specifici per la rilevazione di temperatura del corpo umano (anche se **non certificati per uso clinico**) ci sono anche pirometri IR. Rispetto ai loro analoghi industriali, hanno una caratteristica che somiglia maggiormente a quella della termopila appena esposta, con ottime prestazioni nel range di interesse e drastico decadimento al di fuori. Rispetto alle termopile consentono tuttavia una distanza di applicazione più sicura (indicativamente 5-15 cm).

In

Figura 7 si mostra un estratto della scheda della termopila di cui si è parlato pocanzi, ma l'intento è quello di risvegliare l'attenzione su un'ambiguità che può presentarsi sulle schede di qualunque strumento: si noti una certa confusione tra accuratezza e precisione, rispetto a quanto prima esposto (per entrare in sintonia abbiamo dovuto quindi parlare genericamente di "prestazioni" e "caratteristiche"). Insomma, è bene prestare attenzione ad annunci che potrebbero giocare in qualche modo sull'ambiguità tra precisione (ripetibilità) ed accuratezza.

Quindi, per accomunare la termopila e il pirometro IR specifico, si potrebbe dire che entrambi hanno caratteristiche che permettono un contenimento dei costi rispetto ai pirometri ad ampio range, con funzionamento anche più soddisfacente purché si resti esclusivamente nello stretto range di destinazione.

Nell'attuale situazione, un'altra caratteristica comune è la possibile criticità di approvvigionamento.

| | |
|--------------------|--|
| Precisione: | Modalità di misurazione dalla fronte $\pm 0,2^\circ\text{C}$ ($\pm 0,4^\circ\text{F}$) nell'intervallo compreso fra $35,5^\circ\text{C}$ e $42,0^\circ\text{C}$ ($95,9^\circ\text{F}$ e $107,6^\circ\text{F}$), $\pm 0,3^\circ\text{C}$ ($\pm 0,5^\circ\text{F}$) in altri intervalli |
| | Modalità di misurazione superficiali $\pm 0,3^\circ\text{C}$ ($\pm 0,5^\circ\text{F}$) con temperature comprese tra $22,0^\circ\text{C}$ e $42,2^\circ\text{C}$ ($71,6^\circ\text{F}$ e $108,0^\circ\text{F}$). Al di fuori di questo intervallo, è pari al valore maggiore tra $\pm 2^\circ\text{C}$ ($\pm 3,6^\circ\text{F}$) e $\pm 4\%$ (percentuale della temperatura effettiva). |
| | Modalità temperatura ambiente $\pm 2^\circ\text{C}$ ($\pm 3,6^\circ\text{F}$) con temperature comprese tra 10°C e 40°C (50°F e 104°F). Al di fuori di questo intervallo, il risultato della misurazione può non corrispondere all'accuratezza di misurazione summenzionata. |

Figura 7: dichiarazione di "prestazioni" per un termometro clinico, riportata tal quale. Si nota una certa ambiguità tra precisione e accuratezza (da cui chi scrive ha trovato opportuno utilizzare il più generico termine "prestazioni").



Discussione di un esempio

Assumiamo di utilizzare un pirometro rispondente alle specifiche sopraesposte, in particolare con una ripetibilità (cioè precisione) di $\pm 1^\circ\text{C}$:

- con ottima approssimazione, più misure ripetute si disporrebbero su una gaussiana, e il 68.3% delle stesse sarebbe compresa in un intervallo attorno al valore centrale da $-\sigma$ a $+\sigma$, dove σ è la deviazione standard delle misure, nel caso in esame proprio pari a 1°C ; insomma il 31.7% delle misure sarebbe affetto da un errore di **oltre** 1°C rispetto al valore reale. Analogamente, il 95% delle misure darebbe risultati entro $\pm 2^\circ\text{C}$ rispetto al valore centrale, col rimanente 5% affetto da scostamenti più ampi³.
- d'altra parte, se le misure errate per eccesso sono cautelative (al più potrebbero risultare troppo restrittive), sono le misure errate per difetto a preoccupare, potendo consentire ingressi che sarebbe raccomandabile impedire. Immaginiamo di misurare $37,5^\circ\text{C}$ (che è il limite massimo oltre il quale non si consente l'ingresso):
 - col 50% di probabilità, la temperatura reale sarà minore o uguale a questo valore;
 - col 19,1% di probabilità potremmo essere davanti a una temperatura reale tra $37,5^\circ\text{C}$ e $38,0^\circ\text{C}$;
 - con un altro 15,0% di probabilità potremmo invece avere temperatura reale tra $38,0$ e $38,5^\circ\text{C}$;
 - nel rimanente 15,9% di casi, potrebbe passare un individuo con temperatura ancora superiore.

Nel caso invece di misura con termometro clinico, o di pirometro ad elevata precisione specifico per la rilevazione della temperatura del corpo (precisione $\pm 0,2^\circ\text{C}$), a fronte di una rilevazione di $37,5^\circ\text{C}$:

- col 50% di probabilità, la temperatura reale sarà minore o uguale a questo valore;
- col 49,4% di probabilità potremmo essere davanti a una temperatura reale tra $37,5^\circ\text{C}$ e $38,0^\circ\text{C}$;
- nel rimanente 0,6% di casi, potrebbe passare un individuo con temperatura superiore a $38,0^\circ\text{C}$.

Per chiarire anche visivamente questa differenza si riportano in Figura 8 i grafici delle gaussiane e delle relative curve cumulate di questi due casi: come si può rilevare, l'utilizzo di uno strumento di maggiore precisione riduce notevolmente la probabilità di far accedere una persona potenzialmente positiva.

Per quanto esposto, è bene osservare che la misura non costituisce un rigoroso calibro passa-non passa, bensì un'attenuazione statistica del problema, con la quale si riducono le probabilità di diffusione. Nell'intensità di attenuazione, la precisione dello strumento gioca senza dubbio un ruolo importante. Se avessimo letto lo stesso valore di $37,5^\circ\text{C}$ da strumento con precisione $\pm 2^\circ\text{C}$, potremmo ancora dire che

³ Si dovrebbe considerare anche l'accuratezza, che è lo scostamento tra la media delle misure ed il valore reale della grandezza.

In termini teorici, immaginiamo che il progetto abbia originato un modello di pirometro che mediamente fornisce la temperatura reale, cioè il bias insito nel modello sia nullo. Ogni esemplare di quel modello ha però un suo bias, o errore sistematico: nella pratica, leggere in una scheda di strumento che l'accuratezza attesa vale $\pm 0,3^\circ\text{C}$, significa che statisticamente i bias dei singoli esemplari formano un'altra gaussiana con valore mediamente nullo e deviazione standard $\pm 0,3^\circ\text{C}$; tuttavia si può stimare che un bias pari a $0,3^\circ\text{C}$ innalza di un altro 2-3% l'insieme di misure fuori dall'intervallo $\pm 1^\circ\text{C}$; inoltre si potrebbe anche supporre che l'utente abbia eseguito una calibrazione del suo strumento dopo l'acquisizione.



nel 50% dei casi il soggetto ha temperatura corporea non superiore; tuttavia la distribuzione delle temperature superiori potrebbe essere più preoccupante:

- in un 9,9% di casi siamo in realtà davanti a una temperatura tra 37,5°C e 38,0°C,
- un 9,3% di probabilità riguarda il caso in cui la temperatura è tra 38,0 e 38,5°C,
- ma le residue possibilità di temperature superiori salgono a oltre il 30%!!!

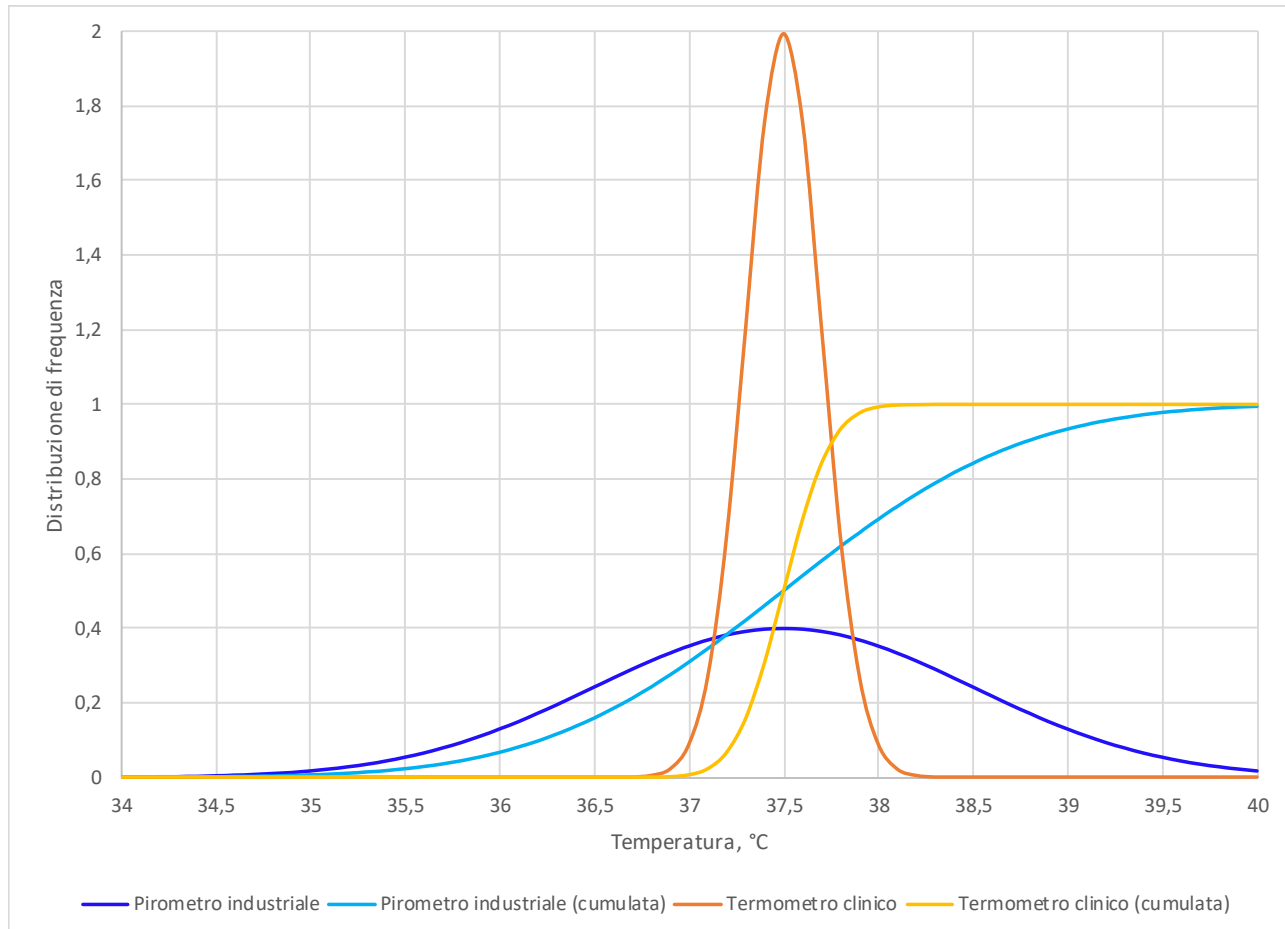


Figura 8 - Distribuzioni di frequenza delle misure dei due strumenti (pirometro industriale e termometro clinico).

Qualora non fossero reperibili nei tempi richiesti strumenti con adeguata precisione, è possibile adottare dei criteri pratici per ridurre la variabilità dei risultati: ad esempio, si potrebbe ripetere più volte la misura al singolo soggetto, ciò che consentirebbe una riduzione dell'incertezza, ma nei protocolli bisogna indubbiamente anche conseguire un compromesso con la praticità e stabilire dei criteri di facile applicazione pratica senza la necessità di eseguire analisi statistiche in tempo reale.

Un esempio di criterio semplificato facilmente applicabile potrebbe essere: il soggetto passa se, rilevando tre volte la temperatura, tutti i valori risultano minori o uguali a 37,5°C. Considerando il peggiore dei casi (tutte e tre le temperature rilevate sono pari a 37,5°C) si ottengono i seguenti risultati:

- col 50% di probabilità, la temperatura reale sarà minore o uguale a questo valore;
- col 30,7% di probabilità potremmo essere davanti a una temperatura reale tra 37,5°C e 38,0°C;
- con un altro 15,2% di probabilità potremmo invece avere temperatura reale tra 38,0 e 38,5°C;
- nel rimanente 4,1% di casi, potrebbe passare un individuo con temperatura ancora superiore.



In Figura 9 si comparano le curve con una e tre rilevazioni eseguite con lo stesso pirometro industriale:

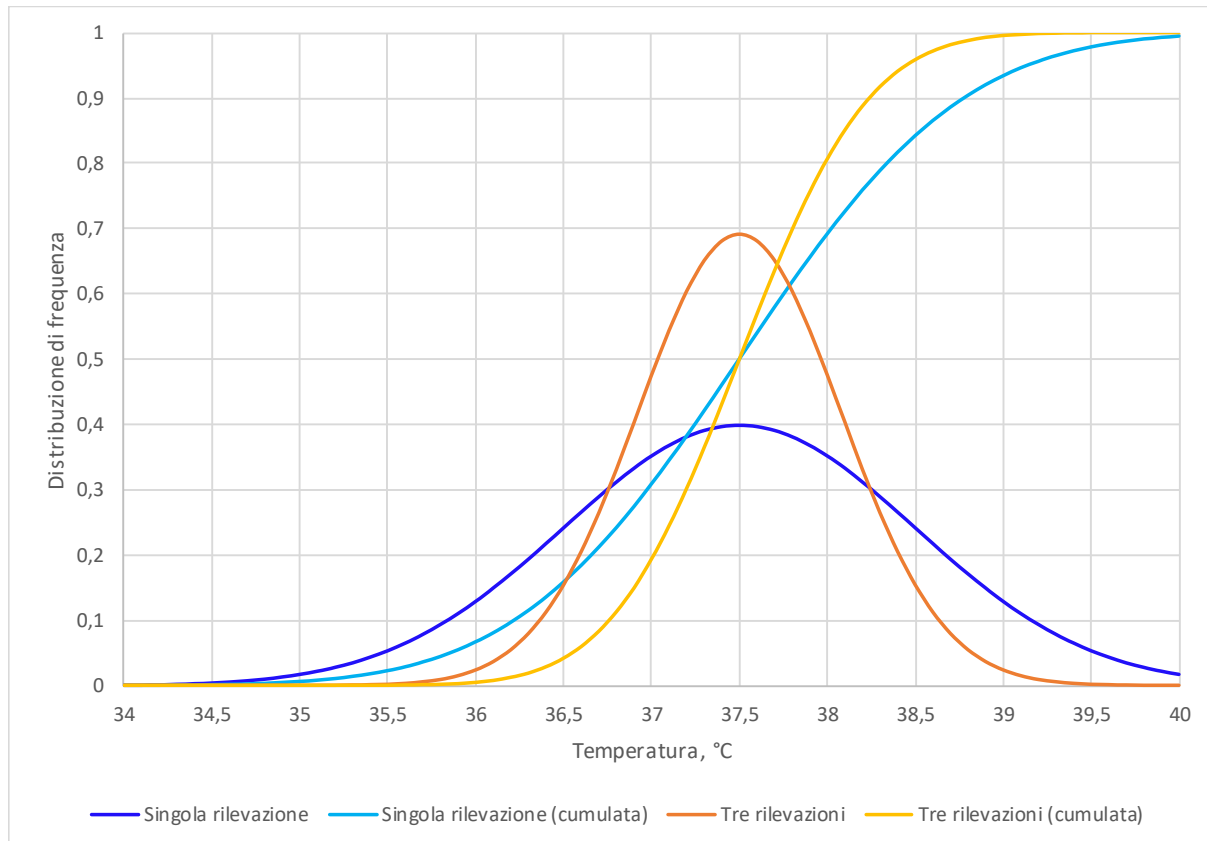


Figura 9 - Comparazione della distribuzione di frequenza tra una e tre rilevazioni eseguite con il medesimo strumento.

Questo è il caso peggiore; ovviamente se una o più rilevazioni dovessero risultare inferiori a 37,5°C il risultato non potrà che migliorare.

Conclusioni

Tirando le somme:

- è importante prestare attenzione alle specifiche tecniche delle soluzioni che si stanno valutando, dalle quali si può dedurre l'adeguatezza delle prestazioni uno strumento;
- in particolare, tra le prestazioni di uno strumento, bisognerebbe poter distinguere chiaramente precisione e accuratezza;
- la scelta tra termocamere e pirometri/termometri clinici è sostanzialmente dettata dall'ambito in cui si vuole effettuare lo screening e dai flussi di persone che lo interessano;
- esistono termometri specifici per le temperature corporee, sia basati sul principio della termopila che su quello ad IR. I primi sono in genere i veri termometri clinici; i secondi possono tuttavia permettere una maggiore distanza di applicazione. Entrambi sono pensati per avere adeguate prestazioni nel range delle temperature corporee, dove in genere saranno preferibili a strumenti nati per altre applicazioni, che magari prevedono una risposta soddisfacente su range di centinaia di °C. L'estrema specificità di questi strumenti ne permette anche una produzione più economica, anche se in questo momento potrebbero verificarsi problemi di approvvigionamento.



- Nell'uso di qualsivoglia strumento, alcuni accorgimenti possono migliorare la qualità delle risposte date dagli stessi: ad esempio misure ripetute, e scelta del punto termico più corretto. Un protocollo di esecuzione chiaro e di buon compromesso con la speditività è comunque di aiuto; anch'esso dalla situazione di ambito e di flusso.
- bisognerà sempre tenere presente che quanto si sta effettuando è uno screening statistico, non un criterio passa-non passa; men che meno bisognerà ritenere il livello di incertezza accettabile per una diagnostica individuale.

Monza, 3 maggio 2020⁴

Roberto Callegari

Eros Tassi

⁴ La presente versione dell'articolo è stata pubblicata il **6 maggio**. Rispetto alla prima versione, in cui si è voluto fornire un contributo tempestivo rispetto alla partenza della fase 2, l'articolo ha contenuti immutati, a meno di qualche revisione di forma che non ne modifica i contenuti ma ne agevola una lettura gradevole.