

Progetto WORKLIMATE

<https://www.workclimate.it/>



Obiettivo Operativo 3 (O3)

Individuazione e sviluppo di soluzioni organizzative e procedure operative:

Report attività 3.1 (A 3.1)

Soluzioni tecnologiche innovative utili in vari ambiti occupazionali tenendo conto dei livelli di rischio e che potrebbero contribuire a contrastare gli effetti dovuti agli estremi termici in generale e il caldo in particolare.

Responsabile Scientifico: Morabito Marco – Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto per la BioEconomia (IBE)

Responsabili Unità Operativa Interna del Dipartimento della Ricerca dell'INAIL: Alessandro Marinaccio e Michela Bonafede - Dipartimento di Medicina, Epidemiologia, Igiene del Lavoro ed Ambientale - Laboratorio di Epidemiologia Occupazionale e Ambientale

Coordinatore Obiettivo Operativo 3 (O3): Azienda USL Toscana Sud Est – Laboratorio di Sanità Pubblica – Settore Agenti Fisici

Referente A 3.1: Azienda USL Toscana Sud Est – Laboratorio di Sanità Pubblica – Settore Agenti Fisici

Autori: Andrea Bogi – Francesco Picciolo – Iole Pinto – Nicola Stacchini

Con il contributo e revisione di: Marco Morabito

Sommario

1. Introduzione	3
2. Liste di riscontro per la valutazione del rischio.....	5
3. Sistemi di monitoraggio individuale per la prevenzione dello stress termico.....	7
3.1 Criteri standard per la valutazione dello stress termico	7
3.2 Sistemi di monitoraggio individuale	9
3.3 Sensori indossabili	11
4. Conclusioni e prospettive per la sperimentazione di sensori indossabili.....	13
5. Prima sperimentazione con indumenti refrigeranti	14
6. Bibliografia	16

1. Introduzione

In genere per tutte le lavorazioni all'aperto o in ambienti chiusi non climatizzati le cui condizioni termiche siano influenzate dalle condizioni termoigrometriche esterne, è sempre necessario effettuare un'attenta valutazione del rischio microclima, finalizzata all'attuazione di appropriate misure di tutela all'insorgere di condizioni di criticità legate al caldo o al freddo.

La valutazione del rischio derivante dall'esposizione al microclima deve essere effettuata ai sensi dell'art. 181 del D.Lgs. 81/2008, secondo cui il datore di lavoro, come chiaramente indicato nel comma 1 dell'art. 28, valuta tutti i rischi derivanti dall'esposizione ad agenti fisici. Non essendo previsto nel Titolo VIII un Capo specifico per il microclima, normativamente occorre considerare quanto richiesto dall'intero Capo I, ossia la finalità della valutazione del rischio, che deve essere tale da identificare e adottare le opportune misure di prevenzione e protezione, con particolare riferimento alle norme di buona tecnica e alle buone prassi (art. 182 comma 1), l'attenzione ai lavoratori particolarmente sensibili (art. 183), gli obblighi di informazione e formazione (art. 184), la sorveglianza sanitaria e la tenuta della cartella sanitaria di rischio (artt. 185 e 186).

Pertanto, esiste da parte del datore di lavoro, ai sensi dell'art. 17 del D. Lgs. 81/2008 l'obbligo, sanzionabile e non delegabile, della valutazione del rischio microclima e della elaborazione del documento di cui all'art. 28, in cui dovranno essere identificate le opportune misure preventive e protettive da adottarsi per minimizzare il rischio. Tale documento deve rappresentare lo "strumento operativo di pianificazione degli interventi aziendali e di prevenzione".

Nel caso di impiego di DPI impermeabili, tute in tyvek etc. andrà effettuata sempre una valutazione specifica, in relazione all'attività svolta.

Al fine di promuovere un'efficace valutazione del rischio sono state sviluppate e rese disponibili sul sito del Portale Agenti Fisici (PAF) liste di riscontro, che consentono di individuare la presenza del rischio per predisporre le idonee misure di tutela (paragrafo 2). Sono inoltre stati pubblicati alla sezione Microclima/calcolatori del PAF strumenti di calcolo che consentono la stima dell'Indice di calore (Heat Index) e del PHS.

L'uso di tali strumenti consente di stabilire le condizioni di temperatura ed umidità relativa che - se riscontrate sul posto di lavoro - determinano l'insorgenza di criticità che richiedono l'attuazione di misure di prevenzione dello stress termico, in relazione alle differenti attività svolte, se in presenza di sole o ombra, ed in relazione alle differenti mansioni svolte, abbigliamento etc. individuabili e selezionabili dall'utente.

In tal modo, l'uso di un semplice termoigrometro sul posto di lavoro consentirà di individuare l'insorgenza di condizioni termiche critiche precedentemente individuate nell'ambito della valutazione del rischio e la necessità di attivare il piano di prevenzione del rischio predisposto.

È da considerare al riguardo che esistono situazioni nelle quali nessuna delle due norme tecniche UNI EN ISO 7243 (metodo WBGT utilizzato nelle mappe previsionali Workclimate) o UNI EN ISO 7933 (metodo PHS) risulta adeguata a eseguire una valutazione dello stress termico da ambiente caldo.

Il primo caso è quello nel quale il soggetto esposto indossa abbigliamento protettivo. La norma UNI EN ISO 7243 consente, in linea di principio, di tener conto del particolare isolamento termico determinato dall'uso di abbigliamento protettivo aggiungendo al valore dell'indice WBGT un "CAV" (Clothing Adjustment Value). Tuttavia, la limitata disponibilità di valori di CAV disponibili, la formulazione assai generica delle definizioni degli abbigliamento a cui associare un CAV, unite alla natura approssimativa dell'indice WBGT, non rendono questa opzione particolarmente attraente. In alternativa è possibile fare uso dei fattori proposti dalla norma tecnica inglese BS 7963 mediante i quali correggere il risultato ottenuto con il metodo PHS. Ciò implica tuttavia un percorso piuttosto complesso ed un risultato finale la cui affidabilità non è al momento quantificabile.

Il secondo caso è quello delle esposizioni in ambienti termicamente violenti. Con questo termine si identificano ambienti nei quali i valori limite per la temperatura e per la perdita di liquidi ($t_{re,max} = 38^{\circ}C$, $D_{max,95} = 5\%/3\%$ del peso corporeo del soggetto) vengono raggiunti in tempi molto brevi (indicativamente inferiori a 30 minuti). Considerato il rischio potenzialmente associato ad un'esposizione ad ambienti così estremi, qualsiasi valutazione basata su una modellistica relativa a soggetti "medi" come il PHS, per quanto sofisticata, risulta inadeguata. Si raccomanda pertanto che esposizioni in questi ambienti avvengano esclusivamente sotto diretta ed individuale supervisione medica, come peraltro esplicitamente indicato nella norma UNI EN ISO 7933 (punto 6.3).

È inoltre sempre da considerare che per soggetti in condizioni di suscettibilità individuale l'insorgenza dello stress termico può verificarsi anche per condizioni termiche ambientali per cui i valori PHS o WBGT forniscono risultati "a basso rischio".

In tutti questi casi, al fine di prevenire il rischio da stress termico, qualora non sia possibile evitare l'esposizione del lavoratore, sarà necessario ricorrere a misure di prevenzione e di monitoraggio da valutarsi caso per caso, in stretta collaborazione con il Medico Competente.

Il presente rapporto fornisce una disamina delle possibili tecniche di monitoraggio individuale ed ambientale alla luce delle recenti innovazioni disponibili nel campo della sensoristica e dei sistemi di monitoraggio indossabili.

In tali contesti lavorativi è da considerarsi che – ai fini della riduzione del rischio da stress termico - esiste la possibilità di ricorrere ad indumenti refrigeranti e sistemi di raffrescamento ausiliari indossabili che possono essere utili per prevenire l'insorgenza dello stress termico. Tali sistemi sono già ampiamente diffusi in vari ambiti sportivi, ricreazionali e sanitari ma trovano ancora scarsa diffusione in ambito lavorativo.

I più comuni sistemi ausiliari refrigeranti consistono in:

- applicazione di materiale freddo (tipicamente ghiaccio o gel refrigerati) tra indumento da lavoro e corpo del lavoratore;
- indumenti refrigerati ad aria;
- indumenti refrigerati ad acqua;
- indumenti refrigerati a cambio di fase

Come avviene per i DPI, l'adozione di tali sistemi dovrà essere attentamente vagliata in relazione ai requisiti ergonomici e sottoposta a giudizio di accettabilità da parte del lavoratore. È sempre da considerare che molti sistemi di raffreddamento indossabili sono talvolta ingombranti o poco pratici nell'impiego lavorativo.

A tal fine, nell'ambito del presente rapporto si presentano i risultati preliminari della sperimentazione condotta in campo di indumenti refrigeranti ad acqua e a scambio di calore volta a valutare l'efficacia di tali sistemi in diversi contesti operativi.

2. Liste di riscontro per la valutazione del rischio

Sul sito del Portale Agenti Fisici, alla Sezione Microclima/FAQ (https://www.portaleagentifisici.it/faq_viewer_microclima.php?id=74) è scaricabile la seguente lista di riscontro (**Tabella 1**) contenuta nelle Linee di Indirizzo del Coordinamento delle Regioni – Inail – ISS per la valutazione del rischio Microclima.

Fattore	Descrizione	SI
Temperatura aria	Ambienti chiusi: La temperatura dell'aria è mai superiore a 28 °C o inferiore a 12 °C?	
	La temperatura dell'aria è soggetta a escursioni nell'arco della giornata lavorativa?	
	La temperatura dell'aria è soggetta a forti cambiamenti in relazione alle condizioni meteorologiche esterne?	
Temperatura radiante	Sono presenti sorgenti calde nell'ambiente?	
	Sono presenti vetrate, coperture etc. che inducono disagio termico nell'ambiente in relazione alle condizioni meteo esterne?	
Umidità	Ci sono macchinari/attrezzature che producono vapore?	
	L'umidità dell'ambiente di lavoro è influenzata dalle condizioni esterne?	
	Sono evidenti macchie di umidità/muffa?	
	L'umidità relativa è inferiore al 30%?	
Flussi d'aria	Nell'ambiente di lavoro sono riscontrabili flussi d'aria calda o fredda?	
	I lavoratori lamentano spifferi/correnti d'aria fastidiose?	
Dispendio metabolico	Il lavoro svolto richiede mai sforzo fisico in condizioni di caldo?	
	I lavoratori svolgono lavoro sedentario in condizioni di freddo?	
DPI e indumenti di lavoro	Il lavoro richiede l'impiego di DPI per proteggersi da agenti chimici, fisici, biologici, maschere, tute speciali, guanti, caschi etc.. I lavoratori usano DPI impermeabili al vapore?	
DPI e indumenti di lavoro	È necessario indossare indumenti di lavoro non modificabili in relazione alle condizioni meteo?	
	È necessario indossare protezioni delle vie respiratorie?	

Tabella 1: Lista di riscontro per la valutazione del rischio microclima

Come si evince dalla lista di riscontro l'uso dei DPI o indumenti da lavoro particolari necessita sempre di una valutazione ad hoc, in relazione alla possibile insorgenza di stress termico per il lavoratore, così come le attività che richiedono elevato sforzo fisico.

A partire da tale ricognizione preliminare dovranno essere individuate le opportune strategie aziendali mirate alla prevenzione del rischio in relazione alle criticità riscontrate.

Tra queste risultano di fondamentale importanza la scelta di opportuni sistemi di monitoraggio individuale, quali sensori indossabili per il monitoraggio dello stress termico e per la segnalazione di allerta insorgenza malattia da calore, in tutte quelle condizioni operative in cui gli indicatori standard per la prevenzione dello stress termico non sono applicabili o per lavori che devono essere comunque effettuati in condizioni estreme.

Essi verranno discussi nel successivo paragrafo.

3. Sistemi di monitoraggio individuale per la prevenzione dello stress termico

3.1 Criteri standard per la valutazione dello stress termico

La valutazione dello stress termico da ambiente caldo può essere effettuata mediante uno dei due schemi illustrati nella vigente normativa tecnica:

1. WBGT (Wet Bulb Globe Temperature), descritto nella norma UNI EN ISO 7243.

Il WBGT è un indice empirico che in sostanza serve soltanto a stabilire se in una determinata situazione è possibile escludere la presenza di un rischio termico da caldo.

L'indice WBGT è dato da una media di due o tre temperature, pesate con opportuni coefficienti. Esso può poi essere corretto con un opportuno fattore CAV (Clothing Adjustment Value) nel caso in cui il vestiario in esame differisca da quello di riferimento (camicia di cotone a maniche lunghe e pantaloni in cotone, $I_{cl} = 0,6$ clo).

Il valore dell'indice WBGT così ottenuto viene confrontato con un valore di riferimento che dipende unicamente dall'attività eseguita, ovvero dal metabolismo energetico, e dall'acclimatamento del soggetto. Se il valore dell'indice WBGT supera il valore di riferimento, secondo quanto indicato nella sezione 4 della norma occorre ridurre lo stress termico mediante metodi appropriati oppure effettuare una valutazione più approfondita mediante il modello PHS.

Il valore dell'indice WBGT così ottenuto viene confrontato con un valore di riferimento ($WBGT_{ref}$) il cui valore dipende unicamente dall'attività eseguita, ovvero dal metabolismo energetico, e dall'acclimatamento del soggetto. $WBGT_{ref}$ può essere calcolato utilizzando una delle due relazioni di seguito riportate

- Per soggetto acclimatato:

$$WBGT_{ref} = 56,7 - 11,5 \times \log_{10}(M)$$

- Per soggetto non acclimatato:

$$WBGT_{ref} = 59,9 = 14,1 \times \log_{10}(M)$$

dove M è espresso in W.

L'andamento delle due espressioni di $WBGT_{ref}$ in funzione del metabolismo energetico è riportato nella **Figura 1** di seguito riportata.

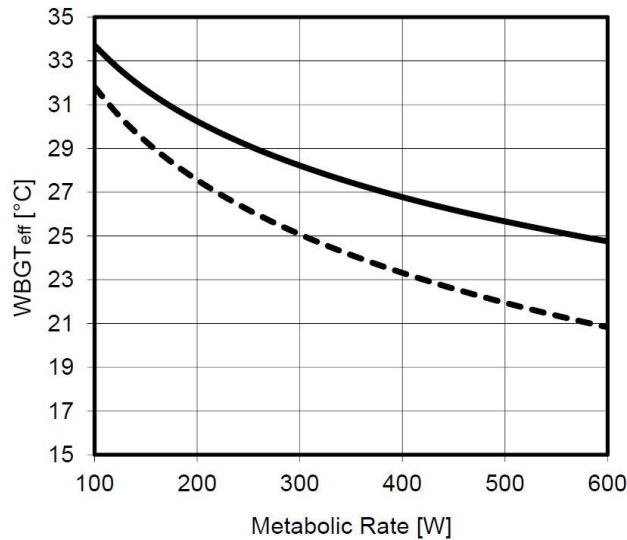


Figura 1. Andamento di $WBGT_{ref}$ in funzione del metabolismo energetico, sia per un soggetto acclimatato (curva a tratto pieno) che per un soggetto non acclimatato (curva tratteggiata)

Se il valore dell'indice $WBGT$ supera il valore di riferimento, secondo quanto indicato nella sezione 4 della norma occorre ridurre lo stress termico mediante metodi appropriati oppure effettuare una valutazione più approfondita mediante il modello PHS.

2. PHS (Predicted Heat Strain) descritto nella norma UNI EN ISO 7933.

Il modello PHS permette di effettuare una valutazione più approfondita dello stress da caldo tenendo conto di fattori più complessi come la dipendenza dal tempo delle variabili fisiologiche, l'effetto del movimento sull'isolamento termico dell'abbigliamento, l'effetto del metabolismo energetico sulla temperatura del nucleo.

Il modello è applicabile quando i sei parametri fondamentali sono contenuti nei seguenti intervalli di valori:

$$15\text{ °C} < t_a < 40\text{ °C}$$

$$0\text{ KPa} < p_a < 4,5\text{ KPa}$$

$$0\text{ °C} < t_r - t_a < 60\text{ °C}$$

$$0\text{ m/s} < v_a < 3\text{ m/s}$$

$$100\text{ W} < m < 450\text{ W}$$

$$0,1\text{ clo} < I_{cl} < 1\text{ clo}$$

Il modello PHS si basa su un codice iterativo che simula la risposta dell'organismo in presenza di determinate quantità fisiche ambientali e quantità soggettive (metabolismo e resistenza termica del vestiario). Esso restituisce gli andamenti nel tempo della temperatura rettale t_{re} e della perdita totale di acqua D .

Confrontando tali andamenti con i corrispondenti valori limite:

- $t_{re,max} = 38\text{ °C}$;
- $D_{max,95} = 5\%$ del peso corporeo del soggetto o 3% del peso corporeo in assenza di apporto di acqua,

si ottengono due stime indipendenti del tempo di esposizione massimo ammesso. Per ovvie considerazioni di cautela, ai fini della valutazione del rischio va utilizzata la più piccola delle due stime.

Esistono tre situazioni nelle quali nessuna delle due norme tecniche UNI EN ISO 7243 o UNI EN ISO 7933 risulta adeguata a eseguire una valutazione dello stress termico da ambiente caldo.

Il primo caso è quello e soggetti che presentino vulnerabilità individuali: le norme sono basate su individui che non abbiano problemi di termoregolazione, e in buone condizioni fisiche.

Il secondo è quello in cui il soggetto esposto indossa abbigliamento protettivo. La norma UNI EN ISO 7243 consente, in linea di principio, di tener conto del particolare isolamento termico determinato dall'uso di abbigliamento protettivo aggiungendo al valore dell'indice WBGT un "CAV" (Clothing Adjustment Value). Tuttavia, la limitata disponibilità di valori di CAV, la formulazione assai generica delle definizioni degli abbigliamento a cui associare un CAV, unite alla natura approssimativa dell'indice WBGT, non rendono questa opzione particolarmente attraente. In alternativa è possibile fare uso dei fattori proposti dalla norma tecnica inglese BS 7963 mediante i quali correggere il risultato ottenuto con il metodo PHS. Ciò implica tuttavia un percorso piuttosto complesso ed un risultato finale la cui affidabilità non è al momento quantificabile.

Il terzo caso è quello delle esposizioni in ambienti termicamente violenti. Con questo termine si identificano ambienti nei quali i valori limite citati in precedenza per la temperatura e per la perdita di liquidi ($t_{re,max} = 38$ °C, $D_{max,95} = 5\%/3\%$ del peso corporeo del soggetto) vengono raggiunti in tempi molto brevi (indicativamente inferiori a 30 minuti). Considerato il rischio potenzialmente associato ad un'esposizione ad ambienti così estremi, qualsiasi valutazione basata su una modellistica relativa a soggetti "medi" come il PHS, per quanto sofisticata, risulta inadeguata. Si raccomanda pertanto che esposizioni in questi ambienti avvengano esclusivamente sotto diretta ed individuale supervisione medica, come peraltro esplicitamente indicato nella norma UNI EN ISO 7933 (punto 6.3).

In questi casi al fine di prevenire il rischio da stress termico, qualora non sia possibile evitare l'esposizione del lavoratore, sarà necessario ricorrere a misure di prevenzione e di monitoraggio da valutarsi caso per caso, in stretta collaborazione con il Medico Competente.

3.2 Sistemi di monitoraggio individuale

Un metodo di valutazione dello stress termico a partire dalla determinazione del monitoraggio individuale di parametri fisiologici del lavoratore è fornito dallo standard internazionale UNI EN ISO 9886.

La valutazione effettuata secondo tale metodo è molto più complessa delle valutazioni standard precedentemente descritte, in quanto sono da effettuarsi su ciascun lavoratore esposto: in questo caso l'esito del monitoraggio tiene conto delle caratteristiche individuali di ciascun soggetto esposto e consente la valutazione e prevenzione dell'insorgenza dello stress termico nelle condizioni in cui le metodiche standard non possono essere applicate.

La norma illustra i metodi per la misurazione e l'interpretazione dei seguenti parametri fisiologici:

1. temperatura del nucleo corporeo (body core temperature);
2. temperature della cute;
3. frequenza cardiaca;
4. perdita di massa corporea.

Tenuto conto del grado di invasività e delle difficoltà di misura di alcuni di tali parametri, da alcuni studi condotti (Merlino et.al., 2019) appare che l'unico parametro effettivamente utilizzabile sul campo per valutazioni di igiene industriale è quella della misurazione della frequenza cardiaca.

Tale criterio assume che la frequenza cardiaca (HR) di un individuo può essere considerata data dalla somma dei seguenti fattori:

$$HR = HR_0 + \Delta HR_M + \Delta HR_S + \Delta HR_T + \Delta HR_N + \Delta HR_\epsilon$$

dove

HR_0 : frequenza cardiaca media del soggetto a riposo, seduto, in condizioni di neutralità termica

ΔHR_M : incremento connesso con il lavoro muscolare dinamico

ΔHR_S : incremento connesso con il lavoro muscolare statico

ΔHR_T : incremento dovuto allo stress termico cui è sottoposto il soggetto

ΔHR_N : incremento correlato con fattori psicologici

ΔHR_ϵ : incremento residuo correlato al ritmo della respirazione, ritmo circadiano,

Pertanto, l'incremento della frequenza cardiaca dovuta allo stress termico - ΔHR_T - può essere determinato studiando la curva $HR(t)$, curva di rilassamento di HR in funzione del tempo tra il momento di massimo stress termico e quello di avvenuto recupero.

ΔHR_T rappresenta l'extra-battito ancora presente dopo il recupero degli sforzi muscolari, cosa che avviene dopo circa 3-4 minuti, istante nel quale la curva cambia pendenza.

La norma ne fissa il seguente Limite:

$$\Delta HR_{T,max} = 33 \text{ battiti/min}$$

Il principale limite di tale metodica è l'impossibilità di restituire i risultati in tempo reale, una certa arbitrarietà nella determinazione degli extra-battiti cardiaci riconducibili all'innalzamento termico del nucleo corporeo e una scarsa praticabilità sul campo, considerato che per ogni esposizione al calore ritenuta pericolosa, si deve prevedere l'interruzione dal lavoro dell'addetto allo scopo di eseguire una misurazione della frequenza cardiaca in un ambiente a temperatura controllata con il soggetto a riposo e per un tempo prolungato (almeno 15 minuti).

Esistono tuttavia soluzioni che, pur non essendo previste in standard internazionali, possono risultare utili per giungere ad un'attendibile e praticabile valutazione e monitoraggio individuale dello stress termico basata sul monitoraggio della frequenza cardiaca.

Si esamina nel seguito – in quanto di particolare interesse ai fini dell'igiene industriale - il metodo elaborato da Mark J. Buller nel 2013 (Buller et al, 2013), il quale ha dimostrato che la frequenza cardiaca HR può essere letta come una funzione della temperatura del nucleo tcr, distorta da rumore e filtrata applicando un filtro Kalman. Il sistema restituisce risultati paragonabili a quelli della misura della temperatura esofagea e, pur non potendolo ritenere sostitutivo della misura diretta della tcr, risulta sufficientemente accurato nel fornire un'indicazione operativa della sollecitazione termica del personale nei luoghi di lavoro.

Con un successivo studio del 2015 (Buller et al, 2015) è stata valutata l'accuratezza dell'algoritmo nella stima della tcr nel caso di personale di primo intervento, vestito con abbigliamento protettivo completamente incapsulante. L'esito è stato molto buono. Per valutare l'accuratezza dell'algoritmo gli autori hanno esaminato le differenze tra le temperature misurate direttamente mediante termometri in forma di pillola ingeribile e quelle stimate dall'algoritmo che elabora i dati sulla frequenza cardiaca. L'algoritmo si è confermato come affidabile e utilizzabile anche nei casi in cui gli addetti indossino abbigliamento protettivo di tipo CBRNE (Chemical Biological Radiological Nuclear and Explosive Equipment).

Nel lavoro del 2015 gli autori conducono anche una disamina dei limiti del metodo ed evidenziano che il modello necessita di essere testato su una popolazione più ampia e più eterogenea; l'attuale è infatti stato

verificato su un gruppo piuttosto omogeneo di soggetti, soprattutto in termini di età e forma fisica (si trattava di militari dell'esercito americano sottoposti ad annuali test sullo stato di salute).

Si fa notare inoltre che il modello lavora al meglio se è nota la temperatura interna iniziale. Tuttavia, potrebbero essere numerose le circostanze in cui questo dato è ignoto, ma in questi casi si può fornire una temperatura ipotetica, per esempio 37.1 °C, tenendo conto che l'incertezza sul risultato aumenta.

Prove fatte in questo senso hanno restituito valori ancora accettabili dei parametri utilizzati per validare il buon comportamento del modello.

La metodica è stata applicata in differenti contesti lavorativi anche in Italia (Merlino et al., 2018, 2019).

Dai risultati delle sperimentazioni condotte in campo gli autori concludono che la metodica di monitoraggio della frequenza cardiaca per stimare la temperatura interna utilizzando l'algoritmo proposto da Buller sia matura e per poter essere applicata per il monitoraggio individuale nella prevenzione e controllo dello stress termico in condizioni di non applicabilità delle metodiche standard.

3.3 Sensori indossabili

Negli ultimi anni la tecnologia dei sensori indossabili per il monitoraggio dei parametri fisiologici sta assumendo un crescente e diffuso impiego soprattutto nell'ambito delle attività sportive e della telemedicina.

Alcuni integrano anche una stima della temperatura del nucleo (o temperatura rettale) quale grandezza derivata dalla frequenza cardiaca e tra questi citiamo il dispositivo chiamato BioHarness della Zephyr e quello denominato EQ02 della Equival.

Sono disponibili diverse tipologie di sensori indossabili che controllano la sola frequenza cardiaca con tecnologia ottica, tipicamente indirizzati agli sportivi.

Come precedentemente discusso è possibile ricavare i valori della temperatura del nucleo a partire da letture della frequenza cardiaca (1 dato al minuto), mediante l'algoritmo di Buller, anche senza scrivere del codice ad-hoc. Sul sito Internet della USARIEM (US Army Research Institute of Environmental Medicine) è infatti pubblicato un calcolatore online che implementa lo stesso calcolo (questo l'indirizzo: https://www.usariem.army.mil/index.cfm/modeling/cbt_algorithm#estimate). Merlino et. al. (2018,2019, 2020) hanno utilizzato questo calcolatore per verificare l'esattezza dei risultati ottenuti con valutazioni effettuate in diverse condizioni sperimentali.

Gli autori (Merlino et. al. 2019) hanno effettuato misurazioni della frequenza cardiaca in campo, utilizzando sistemi basati su sensori elettrici (ECG) e dispositivi ottici, da torace i primi, da polso o braccio i secondi. Dallo studio emerge che il miglior compromesso tra affidabilità, costo, maneggevolezza e facilità di utilizzo, è raggiunto dai sensori ottici da indossare sul braccio, ed in particolare un modello a 6 LED.



Figura 2. (da Merlino et. Al dBA 2019) Tipologia di dispositivo da noi adottato per gli accertamenti di igiene industriale (cardiofrequenzimetro da braccio con tecnologia ottica a sei LED)

Di recente è stato prodotto negli Stati Uniti un sensore indossabile da braccio, resistente all'acqua, specificamente designato per la prevenzione dello stress termico nelle attività lavorative (Kenzen). Il sensore è dotato di un sensor a fotoplethysmografo per la misura della frequenza cardiaca, e di sensori di temperatura ed umidità relativa internamente ed esternamente al dispositivo, finalizzati alla misura della differenza tra le misure di temperatura ed umidità della pelle e ambientali. Inoltre, il dispositivo è munito di un accelerometro triassiale per la misura della velocità di deambulazione.

L'algoritmo di calcolo della temperatura interna utilizzata dal dispositivo Kenzen è stato valutato con studi ad hoc, simili a quelli condotti dal metodo Buller. I risultati forniscono analogo livello di accuratezza. Il dispositivo consente sia di effettuare valutazioni del rischio in campo sia di fornire segnale di allarme al lavoratore all'insorgere di condizioni di stress termico ($T_c = 39\text{ °C}$ in accordo con i criteri NIOSH) fornendo allarme via APP anche ai referenti della sicurezza dell'attività lavorativa.

Il dispositivo non è al momento disponibile sul mercato italiano.

Nell'ambito del presente progetto è stato condotto uno studio di fattibilità per una valutazione sperimentale del dispositivo Kenzen presso una serie di realtà lavorative sul territorio nazionale, adeguandolo opportunamente a specifiche esigenze di tutela, prime fra tutte la possibilità di selezionare le soglie di allarme al conseguimento di T_c inferiori di 39 °C .

Sono stati acquistati 6 dispositivi EQ02 della Equivital che forniscono oltre alla frequenza cardiaca anche il ritmo respiratorio, la temperatura cutanea e l'orientamento del corpo. In post-elaborazione il software a corredo dei dispositivi, a partire dallo storico dei dati registrati durante le misure fornisce la stima della temperatura interna.

Sono state effettuate prove in laboratorio per verificare la correttezza della stima della temperatura interna effettuata dal software Equivital, confrontando i risultati con quelli ottenuti dal software online e l'accordo è stato soddisfacente.

È stato organizzato un primo campo prova per analizzare la fattibilità dell'utilizzo di tale tipologia di sensori, i cui risultati sono in fase di elaborazione.

4. Conclusioni e prospettive per la sperimentazione di sensori indossabili

La possibilità di un efficace monitoraggio individuale dello stress termico è in generale molto importante poiché le risposte organiche alle sollecitazioni termiche degli individui possono essere diverse, anche a parità di compito lavorativo. Essa è altresì imprescindibile quando le norme tecniche risultano inadeguate per eseguire una valutazione attendibile dello stress termico da ambiente caldo.

Lo sviluppo tecnologico della sensoristica unita alle tecnologie di controllo in tempo reale mediante APP e allo sviluppo di reti di trasmissione ITC consente di poter fruire di alcuni metodi di monitoraggio affidabili della temperatura interna del corpo, al fine di consentire una appropriata valutazione e prevenzione del rischio da malattie da calore in condizioni in cui le metodiche standard non possono essere applicate.

L'algoritmo di calcolo della temperatura interna del corpo elaborato da Buller e colleghi è in grado di fornire stime ragionevolmente valide della temperatura interna in diversi contesti. Inoltre, l'algoritmo, se utilizzato congiuntamente a un sistema di monitoraggio della frequenza cardiaca indossato dal lavoratore, consente di rilevare lo stress termico dell'individuo in tempo reale permettendo così di prevenire l'insorgenza di malattie da calore o stati patologici o incidenti dovuti all'eccesso di calore, oltre che a gestire al meglio i programmi di lavoro.

Il dispositivo indossabile Kenzen – opportunamente adattato ai requisiti di tutela e controllo del rischio adottati nel nostro Paese– può essere in grado di proteggere il lavoratore dall'insorgenza di malattia da calore, e di inviare segnali di allarme e i risultati del monitoraggio anche agli addetti alla sorveglianza/primo soccorso.

Entrambi i sistemi dovranno essere oggetto di sperimentazione ad hoc sul territorio nazionale, per poter essere inseriti in maniera efficace nel sistema di prevenzione del rischio aziendale, in relazione alle esigenze dei diversi ambiti occupazionali ove dalla valutazione del rischio microclima emerge l'esigenza di attivare il monitoraggio individuale per la prevenzione delle malattie da calore.

5. Prima sperimentazione con indumenti refrigeranti

La sperimentazione ha riguardato gilet da lavoro ad alta visibilità refrigeranti del tipo a cambio di fase e ad acqua.

Gli indumenti a cambio di fase utilizzano al loro interno inserti costituiti da un materiale – tipicamente gel - con un elevato punto di fusione, tipicamente nell'intervallo 12 °C - 20°C. Il calore viene assorbito quando il materiale passa dalla fase solida a quella liquida. Gli inserti vanno tenuti in frigorifero prima dell'impiego e sostituiti tipicamente ogni 2-3 ore.

Tali indumenti presentano un costo notevolmente più elevato degli indumenti ad acqua; sono indicati soprattutto per ambienti caldi e chiusi, dove gli indumenti di tipo evaporativo sono in genere di scarsa efficacia.

Gli indumenti refrigeranti di tipo evaporativo sono costituiti da un tessuto che assorbe rapidamente l'acqua e la rilascia molto lentamente attraverso il meccanismo dell'evaporazione, meccanismo che consente di rinfrescare l'organismo. L'indumento va immerso per alcuni minuti in acqua prima dell'impiego e spremuto per eliminare l'acqua in eccesso. Deve essere lasciato anche per qualche minuto all'aria prima di essere indossato per eliminare l'eccesso di umidità. Tali indumenti sono indicati in genere per lavorazioni outdoor.

Sono stati sperimentati un totale di 100 indumenti refrigeranti in collaborazione con i Dipartimenti di Prevenzione delle ASL referenti territorialmente, presso quattordici aziende nei seguenti comparti:

- Attività Portuali (Viareggio, Carrara, Piombino): piazzalisti ed addetti stiva
- Cantieristica navale (Viareggio): addetti verniciatura
- Manutenzione Verde (Viareggio; Siena)
- Edilizia (Viareggio)
- Consegne su motocicli (Viareggio)

Nell'ambito della sperimentazione sono stati distribuiti questionari di gradimento, in fase di elaborazione a cura della UO 3.

Dalla sperimentazione preliminare - per quanto riferito dagli operatori coinvolti – emerge quanto segue:

- Sarebbe necessario avere taglie uniche e non accorpate (es: L+XL), come spesso avviene per gli indumenti da lavoro, e nella fattispecie per i gilet evaporativi testati, in quanto la funzionalità degli indumenti dipende molto dalla corretta vestibilità: gli indumenti troppo larghi presentano criticità e sono di ingombro.
- Gli indumenti ad evaporazione risultano particolarmente efficaci soprattutto nelle condizioni meteo climatiche critiche all'aperto, quando il rischio da stress termico è elevato. Riscontri positivi sono stati ottenuti sia in edilizia che nelle lavorazioni agricole, e per le lavorazioni in piazzale in condizioni di esposizione solare diretta.
- Gli indumenti ad evaporazione risultano poco confortevoli ed efficaci in ambienti parzialmente confinati con tasso piuttosto elevato di umidità e privi di irraggiamento diretto del sole, ad esempio lavorazioni dentro le stive delle navi porta container.

Fondamentale è il loro corretto utilizzo/attivazione, attenendosi rigidamente alle istruzioni fornite dal costruttore, per evitare un possibile fastidioso gocciolamento. Le criticità si sono riscontrate laddove i gilet sono rimasti eccessivamente umidi, non essendo stati attivati correttamente.

I gilet a cambio di fase sono risultati generalmente molto efficaci e particolarmente apprezzati dai lavoratori nelle lavorazioni di verniciatura in capannone, e per i lavoratori in moto. Sono consigliabili soprattutto per le

lavorazioni in ambienti caldi indoor, laddove gli indumenti ad evaporazione presentano una limitata efficacia, e per le attività a bordo di mezzi di trasporto, motocicli e biciclette.

6. Bibliografia

Australian Institute of Occupational Hygienists (AIOH) 2013. A guide to managing heat stress: developed for use in the Australian environment.

A. Merlino, G. Gambino, G. Quadrio (2018) Valutazione dello stress termico per lavoratori sottoposti ad alti carichi, in regime di non applicabilità delle metodiche WBGT e PHS, atti del convegno nazionale dBA 2018 (Bologna, 17 ottobre 2018)

A. Merlino, G. Gambino, D. Meda, G. Quadrio (2019) Accertamenti di stress termico mediante monitoraggio della frequenza cardiaca degli esposti, atti del convegno nazionale dBA 2019 (Bologna, 17 ottobre 2019)

A. Merlino, G. Gambino, (2020) COVID-19: il rischio microclimatico per gli operatori di primo soccorso, PuntoSicuro, anno 22, numero 4732

BS 7963:2000 Guide to the assessment of heat strain in workers wearing personal protective equipment

Coordinamento Tecnico per la sicurezza nei luoghi di lavoro delle Regioni e delle Province autonome – INAIL – ISS : "Decreto Legislativo 81/2008, Titolo VIII, sulla prevenzione e protezione dai rischi dovuti all'esposizione ad agenti fisici nei luoghi di lavoro Indicazioni operative: Rischio Microclima" – Giugno 2021 https://www.portaleagentifisici.it/faq_explorer_microclima.php?lq=IT

UNI EN ISO 7243. Ergonomia degli ambienti termici - Valutazione dello stress da calore utilizzando l'indice WBGT (temperatura globo del bulbo bagnato. UNI, Milano, Italia, 2017

UNI EN ISO 7933:2005 Ergonomia dell'ambiente termico - Determinazione analitica ed interpretazione dello stress termico da calore mediante il calcolo della sollecitazione termica prevedibile

M. J Buller et al. (2013) Estimation of human core temperature from sequential heart rate observations, Physiological Measurement, 34, 781-798

M. J. Buller et al. (2015) Real-time core body temperature estimation from heart rate for first responders wearing different levels of personal protective equipment, Ergonomics, 58:11, 1830-184

Moyen, N.E.; Bapat, R.C.; Tan, B.; Hunt, L.A.; Jay, O.; Mündel, T. Accuracy of Algorithm to Non-Invasively Predict Core Body Temperature Using the Kenzen Wearable Device. Int. J. Environ. Res. Public Health 2021, 18, 13126. <https://doi.org/10.3390/ijerph182413126>

UNI EN ISO 7243. Ergonomics of the Thermal Environment—Assessment of Heat Stress Using the WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) Index, 3rd ed.; ISO/TC 159/SC 5 Ergonomics of the Physical Environment; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2017.

UNI EN ISO 7933:2005 Ergonomia dell'ambiente termico - Determinazione analitica ed interpretazione dello stress termico da calore mediante il calcolo della sollecitazione termica prevedibile.

UNI EN ISO 8996. Ergonomics of the Thermal Environment—Determination of Metabolic Rate, 2nd ed.; ISO/TC 159/SC 5 Ergonomics of the Physical Environment; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2004.

UNI EN ISO 12894:2002 Ergonomia degli ambienti termici - Supervisione medica per persone esposte ad ambienti molto caldi o molto freddi

UNI EN ISO 9886:2004 Ergonomia - Valutazione degli effetti termici (thermal strain) mediante misurazioni fisiologiche

US Army Research Institute of Environmental Medicine (USARIEM), Core Body Temperature Estimation From Heart Rate, 13 June 2014, http://www.usariem.army.mil/index.cfm/modeling/cbt_algorithm

Washington (DC): U.S. Department of Labor, OSHA; [accessed 2019 Oct 16]. https://www.osha.gov/SLTC/heatillness/heat_index/pdfs/all_in_one.pdf.

Weinbaum S., Jiji L.M., Lemons D.E., 1984. Theory and experiment for the effect of vascular microstructure on surface tissue heat transfer - part I: anatomical foundation and model conceptualization. *ASME J Biomech Eng* 106:321–330.

World Meteorological Organization. Available at: <https://public.wmo.int/en/media/press-release/2020-track-be-one-of-three-warmest-years-record>- Accessed January 18, 2021.