UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria della Sicurezza Civile e Industriale

TESI DI LAUREA

IL MICROCLIMA NEI LUOGHI DI LAVORO

luci e ombre del vigente apparato normativo e nuove metodologie di indagine

Relatore:

Prof.ssa Vianello Chiara

Correlatore:

Ing.Phd. Boniotto Emiliano

Laureando: *Zanardi Matteo*

N° matricola: 2096568

Anno Accademico 2024/2025

INDICE

INTRODUZIONE **1**

CAPITOLO 1 – IL MICROCLIMA NEI LUOGHI DI LAVORO **3**

1.1 IL CAMBIAMENTO CLIMATICO ED IL SUO IMPATTO NEL MONDO DEL LAVORO 4
1.2 GLI EFFETTI DEL MICROCLIMA NEL LUOGO DI LAVORO: L'EQUAZIONE DI BILANCIO ENERGETICO 7

CAPITOLO 2 – IL QUADRO NORMATIVO **15**

2.1: LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO MICROCLIMATICO SECONDO IL D.LGS 81/08 16
2.2 LA VALUTAZIONE DEGLI AMBIENTI MODERABILI – LA NORMA UNI EN ISO 7730 19
2.2.1 La valutazione del discomfort globale: il metodo PMV e PPD *20*
2.2.2 La valutazione del discomfort locale *23*
2.2.3 La valutazione degli ambienti moderabili non moderati: l'indice di calore (Heat Index) *25*
2.3 LA VALUTAZIONE DEGLI AMBIENTI SEVERI CALDI 28
2.3.1 La Norma UNI EN ISO 7243 – L'indice Wet Bulbe Globe Temperature (WBGT) *28*
2.3.2 La norma UNI EN ISO 7933 – Il metodo del Predicted Heat Strain (PHS) *31*
2.3.3 Il confronto tra le norme UNI EN ISO 7243 e UNI EN ISO 7933 ..... *35*
2.4 LA VALUTAZIONE DEGLI AMBIENTI SEVERI FREDDI – LA NORMA UNI EN ISO 11079 37
2.4.1 La valutazione del discomfort globale: il metodo del Insulation Required (IREQ) *37*
2.4.2 La valutazione del discomfort locale *41*

CAPITOLO 3 – I PARAMETRI MICROCLIMATICI **45**

3.1 LA VALUTAZIONE DEI PARAMETRI AMBIENTALI – NORMA UNI EN ISO 7726 46
3.1.1 La temperatura dell'aria t_a *49*
3.1.2 L'umidità assoluta dell'aria e la pressione parziale di vapor acqueo p_a *49*
3.1.3 La velocità dell'aria v_a *50*
3.1.4 La temperatura media radiante t_r e la temperatura del globo nero t_g *51*
3.1.5 La temperatura neutra del bulbo umido t_{nw} *52*
3.2 LA VALUTAZIONE DEI PARAMETRI SOGGETTIVI 54
3.2.1 Le caratteristiche termiche dell'abbigliamento – Norma UNI EN ISO 9920 ..... *54*
3.2.2 La valutazione del metabolismo energetico – Norma UNI EN ISO 8996 ..... *58*
3.2.3 Le criticità nella valutazione dell'isolamento termico e del metabolismo energetico *66*

CAPITOLO 4 – ANALISI DEL RISCHIO MICROCLIMATICO **71**

4.1 PRIMO CASO STUDIO: *AMBIENTE MODERABILE - UFFICIO* 72
4.1.1 Misure e interpretazione dei dati ottenuti *72*
4.2 SECONDO CASO STUDIO*: AMBIENTE SEVERO CALDO INDOOR – VETRERIA INDUSTRIALE* 78
4.2.1 Misure e interpretazione dei dati ottenuti *79*

CAPITOLO 5 – VALUTAZIONE E ANALISI DEL METABOLISMO ENERGETICO SECONDO IL LIVELLO 3.A **85**

5.1 LA PROCEDURA DI RACCOLTA DATI E DI VALUTAZIONE DELLA FREQUENZA CARDIACA 86
5.2 MISURE E INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI OTTENUTI 89
5.2.1 Analisi microclimatica condotta mediante l'uso del metodo di valutazione di Livello 1 ..... *90*
5.2.2 Analisi microclimatica condotta mediante l'uso del metodo di valutazione di Livello 3.A *93*
5.3 CONFRONTO E ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI OTTENUTI 102

CONCLUSIONI **105**

BIBLIOGRAFIA **107**

ALLEGATI **111**

INTRODUZIONE

Come confermato da numerosi studi in letteratura, l'aumento della concentrazione di gas serra e di altre fonti di inquinamento derivanti dall'attività dell'uomo sta portando ad un aumento significativo delle temperature medie globali che hanno reso i luoghi di lavoro sempre più caldi al quale è associabile l'aumento del numero di casi di infortuni, malattie professionali e decessi causati da condizioni di "stress da calore", soprattutto tra coloro che operano in ambienti outdoor e indoor caldi non climatizzati. Pertanto, al fine di prevenire e ridurre al minimo i rischi per la salute e la sicurezza dei lavoratori, è necessario saper valutare correttamente le condizioni microclimatiche presenti, ossia il complesso di parametri ambientali che caratterizzano localmente il luogo di lavoro poiché questi, insieme ai parametri individuali quali l'intensità dell'attività metabolica e l'isolamento termico dell'abbigliamento indossato, sono in grado di influenzare gli scambi termici tra il soggetto e l'ambiente circostante. Tra le norma tecniche internazionali che consento di determinare tali parametri nell'ambito dell'ergonomia termica, la norma UNI EN ISO 8996 è quella che introduce le quattro metodologie di analisi dell'intensità dell'attività metabolica, le quali sono caratterizzate da livelli crescenti di accuratezza e precisione passando dal primo al quarto livello; ciononostante, nella valutazione degli indici microclimatici che consentono di valutare la condizione di comfort/discomfort e stress termico si predilige l'utilizzo dei metodi di *Livello 1 – Controllo* e di *Livello 2 – Analisi* data la loro semplicità d'utilizzo. Infatti, sebbene le metodologie di analisi di *Livello 3 – Analisi* e di *Livello 4 – Valutazione di esperti* permettano di ottenere una miglior stima dell'intensità dell'attività metabolica, queste vengono comunemente adottate a fini di ricerca e di studio essendo difficilmente applicabili in un contesto lavorativo. Tuttavia, grazie allo sviluppo negli ultimi decenni di dispositivi indossabili di monitoraggio della frequenza cardiaca, il metodo di *Livello 3.A – Analisi - Misurazione della frequenza cardiaca in condizioni definite* risulta essere tra le metodologie di analisi proposte quello in grado di fornire la migliore stima del metabolismo energetico in un contesto operativo.

Pertanto, l'obiettivo di questa tesi sarà quello di illustrare come le condizioni microclimatiche di un ambiente lavorativo siano in grado non soltanto di condizionare la percezione termica, ma anche come queste siano in grado di influenzare gli aspetti fisiologici dell'individuo stesso. Tali argomenti verranno trattati nel *Capitolo 1*, mentre nel *Capitoli 2* e nel *Capitolo 3* verranno introdotte le principali norme tecniche internazionali che consento di eseguire una corretta valutazione del rischio microclimatico. Nel *Capitolo 4* le metodologie di analisi del rischio verranno applicate a due casi studio, un ambiente moderabile (ufficio) ed un ambiente severo caldo indoor (vetreria industriale), al fine di valutare le condizioni di comfort/discomfort e di stress termico provate dai lavoratori adottando il metodo di analisi del metabolismo energetico di *Livello 1 – Controllo*. Infine, nel *Capitolo 5* verrà proposto un metodo di analisi del metabolismo energetico applicabile in un contesto lavorativo basato sul metodo d'analisi di *Livello 3.A – Analisi - Misurazione della frequenza cardiaca in condizioni definite*. Tale metodo verrà successivamente applicato per eseguire una ulteriore valutazione delle condizioni microclimatiche presso l'azienda oggetto del secondo caso studio (vetreria industriale) al fine di verificare se l'utilizzo di tale metodologia consenta realmente di ottenere una miglior valutazione delle

condizioni di comfort/discomfort e di stress termico provato dai lavoratori rispetto a quelli ottenibili facendo riferimento al metodo di analisi di *Livello 1 – Controllo*.

CAPITOLO 1

IL MICROCLIMA NEI LUOGHI DI LAVORO

I rischi e l'impatto del microclima nel contesto lavorativo

1.1 Il cambiamento climatico ed il suo impatto nel mondo del lavoro

In epoca contemporanea, a causa dell'aumento della concentrazione atmosferica di gas serra tra cui il diossido di carbonio e il metano e di altre fonti di inquinamento derivanti dall'attività dell'uomo come la deforestazione e l'allevamento intensivo [2], le temperature medie delle superficie terrestre sono in costante aumento, come confermato da annate di caldo eccezionale e fenomeni metereologici estremi sempre più frequenti [1]. Infatti, come riportato nel report condotto da *FORSTER, Piers M., et al.* [2], nell'ultimo decennio il tasso di riscaldamento globale indotto dall'uomo è risultato essere pari a 0,26 °C mentre le temperature medie annuali hanno ormai raggiunto i + 1,31 °C rispetto all'era preindustriale. Di conseguenza, nei prossimi anni sarà sempre più probabile assistere a periodi di caldo estremo sempre più frequenti [2;3;5] e tali da influenzare negativamente non soltanto la produttività delle attività lavorative [3;4;5], ma anche aumentare la prevalenza, la distribuzione e la severità dei rischi occupazionali [1;6]. Il cambiamento climatico costituirà quindi una delle sfide più impegnative del ventunesimo secolo [1] poiché eventi climatici estremi, come ad esempio le ondate di calore, possono mettere a rischio la salute e la sicurezza dei lavoratori [1;3;4;5;6;7;8]. Infatti, come confermato da numerosi studi in letteratura [1;3;4;5;6;8], negli ultimi anni l'innalzamento delle temperature e dei tassi di umidità dell'aria [3;5] hanno portato ad un aumento dei casi di *malattie professionali*[1] e dei decessi [1;3;5] soprattutto tra coloro che lavorano all'aperto (come nel settore agricolo ed edile) [1;3;4;5;6;8] o in ambienti indoor caldi non climatizzati quali acciaierie, impianti di produzione della ceramica e industrie del vetro [1;5;8]. Infatti, come evidenziato dallo studio di revisione scientifica condotto da *SCHULTE, P. A., et al.* [6], al cambiamento climatico possono essere associati numerosi rischi sia diretti che indiretti per la salute e la sicurezza delle persone e dei lavoratori. Tali rischi possono essere suddivisi nelle seguenti categorie:

- **Rischi connessi all'aumento delle temperature ambientali**: il riscaldamento globale ha reso gli ambienti indoor ed outdoor sempre più caldi esponendo le persone a condizioni di temperatura e umidità tali da favorire l'insorgenza di patologie associabili alle alte temperature (come il colpo di calore o l'eritema da calore), problemi di salute mentale (come ansia e depressione) o il peggioramento di patologie croniche preesistenti, come malattie cardiovascolari e renali [1;5;6;7;8]. In particolare, situazioni di forte discomfort termico possono incoraggiare l'uso improprio se non addirittura il non utilizzo dell'abbigliamento protettivo e dei dispositivi di protezione individuale (DPI) [1;6] esponendo i lavoratori ad ulteriori rischi per la salute e la sicurezza [5] tra cui quelli legati all'esposizione di sostanze pericolose e tossiche. Inoltre, a tali condizioni di disagio termico è stato correlato l'aumento del numero di infortuni [1;5;8] causati, ad esempio, da mani sudate, occhiali di sicurezza appannati, da una riduzione del tempo di risposta [6;8] oppure a causa di stati emotivi indotti dalle alte temperature che possono ridurre il livello dell'attenzione

[1] *Malattie professionali:* le malattie professionali sono eventi dannosi in grado di influenzare le capacità lavorativa delle persone che traggono origine da cause connesse allo svolgimento della prestazione lavorativa [10]. Tra le malattie professionali correlate agli ambienti caldi vi sono la sincope da calore, l'esaurimento della termoregolazione (che nei casi più gravi può portare al colpo da calore), ma anche i crampi da calore, gli eritemi e le ustioni [7;8]. Invece le patologie riconducibili allo svolgimento di attività lavorative in un ambiente freddo vengono suddivise in patologie sistemiche (come l'orticaria da freddo e l'assideramento) e in patologie localizzate, come ad esempio i geloni [7].

dei lavoratori [1;6;8]. Tra coloro maggiormente esposti a tali rischi sono ad esempio i lavoratori nel settore dell'industria metallurgica, nei cantieri edili e nelle attività agricole [1;6] oltre a chi indossa indumenti protettivi semipermeabili/impermeabili e/o dispositivi di protezione che limitano gli scambi termici evaporativi [5;6];

- **Rischi connessi all'inquinamento dell'aria**: le alte temperature favoriscono l'aumento della concentrazione di particelle aerodisperse nell'aria, come la dispersione dei pesticidi nell'aria [1;6], e la formazione di numerosi agenti inquinanti in grado di contribuire a loro volta al riscaldamento globale [6]. Tra queste vi sono sostanze chimiche vasocostrittrici, come il piombo ed i suoi composti inorganici ed i composti del fosforo, in grado di influenzare il sistema di termoregolazione dell'individuo [9] ed aumentare di conseguenza i rischi legati alle alte temperature. Inoltre, l'aumento della temperatura corporea favorisce l'assorbimento, la diffusione e la tossicità delle sostanze chimiche aerodisperse e non [9] a causa dell'aumento della velocità della respirazione, del tasso di sudorazione e del flusso sanguigno cutaneo [6;9] dovuto alla vasodilatazione;

- **Rischi connessi all'esposizione prolungata ai raggi ultravioletti (UV)**: l'aumento della radiazione ultravioletta causato dall'interazione tra i gas serra, il cambiamento climatico e la riduzione dello strato di ozono stratosferico, favorisce l'aumento dei casi di traumi oculari, di tumori cutanei (come il melanoma) ed immunodepressione, in particolare tra coloro le cui attività lavorative si svolgono all'aperto [1;6];

- **Rischi connessi agli eventi climatici estremi**: l'aumento della frequenza, durata ed intensità degli eventi meteorologici estremi quali ondate di calore, inondazioni, uragani, incendi boschivi, è correlabile ad un aumento dei rischi soprattutto tra gli operatori del settore emergenziale (come i vigili del fuoco e gli addetti della protezione civile) [1;6;8] oltre ad un aumento del numero di casi di persone affette da patologie correlate allo stress [1] come malattie cardiovascolari, ansia e depressione [1;6];

- **Rischi connessi alle malattie infettive ed altri rischi biologici**: l'aumento delle temperature indotto dal cambiamento climatico ha portato ad un aumento dei rischi legati alle malattie trasmesse dai vettori biologici, come la malaria e la febbre di Lyme, a causa dell'aumento dei tassi di incubazione dei vettori responsabili e dell'estensione del loro habitat [1;6]. Inoltre, l'estensione dell'habitat di zanzare, pulci e zecche, di piante velenose e malattie fungine [6] favorisce l'uso intensivo di pesticidi ed erbicidi aumentando di conseguenza la probabilità d'esposizione a tali sostanze tossiche [1;6];

- **Rischi connessi alla transizione industriale**: lo sviluppo delle "Green Industries" e in particolare lo sviluppo di nuove fonti di energia rinnovabili [6] ha permesso di limitare l'aumento delle temperature medie globali, nonostante l'introduzione di tali tecnologie abbiano portato all'introduzione di nuovi rischi per la salute e la sicurezza, come ad esempio nel settore della produzione dell'energia eolica [1;6]. Un

esempio ne sono gli interventi climatici di geoingegneria su larga scala, come la *geoingegneria solare*[2], i quali consentono di limitare gli effetti del cambiamento climatico; ciononostante i modelli predittivi hanno evidenziato come tali tecnologie presentino numerosi effetti avversi per le persone ed il pianeta non ancora del tutto noti [6;11];

- **Rischi connessi ai cambiamenti dell'ambiente costruttivo**: nonostante il miglioramento degli standard e delle tecniche costruttive degli edifici sia riuscito a garantire un miglioramento del comfort termico e della sicurezza all'interno degli edifici [1;6], ciò ha favorito un aumento dell'esposizione agli agenti inquinanti presenti al loro interno come ad esempio sottoprodotti della combustione, radon ed altri composti organici volatili e semi-volatili [6]. Inoltre, la riduzione delle aree verdi come parchi e zone alberate negli ambienti urbani può sottoporre i lavoratori che svolgono attività all'aperto ad una maggior condizione di stress termico a causa dell'effetto *isola di calore*[3] [1;6].

Pertanto, poiché il cambiamento climatico può portare in alcune aree geografiche ed in alcuni ambienti di lavoro delle condizioni tali da aggravare il livello di rischio preesistente e/o favorire l'introduzione di nuovi rischi per la salute e la sicurezza, al fine di previene e ridurre al minimo la probabilità di infortuni e malattie professionali sarà necessario eseguire un'attenta ed accurata analisi delle condizioni microclimatiche presenti negli ambienti di lavoro.

[2] *Geoingegneria solare:* la geoingegneria solare, nota come tecnologia SRM (Solar Radiation Modification) è una tecnica di geoingegneria che consente di ridurre la temperatura in alcune aree del pianeta attraverso il rilascio negli strati superiori dell'atmosfera di gas in grado di riflettere i raggi solari, come ad esempio anidride solforoso o solfati di alluminio [11].

[3] *Isola di calore*: fenomeno climatico per cui le aree urbane registrano temperature più alte rispetto alle zone rurali circostanti dovuto principalmente alla maggior presenza di materiali che assorbono e rilasciano il calore (come l'asfalto e il cemento) e alla minore presenza di alberi ed aree verdi [1;6]

1.2 Gli effetti del microclima nel luogo di lavoro: l'equazione di bilancio energetico

Come discusso al paragrafo precedente, l'aumento delle temperature medie globali, della frequenza ed intensità de fenomeni climatici estremi indotti dal cambiamento climatico ha portato all'introduzione di nuovi rischi per la salute e la sicurezza non soltanto negli ambienti outdoor, ma anche in quelli indoor. Tuttavia, sebbene l'aumento della severità, degli infortuni e malattie professionali siano riconducibile a tali fenomeni, essi dipendono dalle condizioni microclimatiche, ovvero l'insieme dei parametri ambientali che caratterizzano localmente l'ambiente in cui l'individuo si trova [3;5;7;12]. Tali parametri, insieme a quelli che caratterizzano il soggetto, sono in grado infatti di influenzare non soltanto la percezione termica provata dall'individuo, ossia la condizioni di comfort/discomfort termico, ma anche aspetti fisiologici legati alle sue funzioni vitali [7;12]. Nello specifico tali parametri comprendono:

- Per quanto riguarda le grandezze ambientali, definite anche come "parametri ambientali":
  - La temperatura dell'aria t_a;
  - La temperatura media radiante t_r;
  - La velocità dell'aria v_a;
  - L'umidità relativa dell'aria RH (o in alternativa l'umidità assoluta dell'aria W_a);
- Per quanto riguarda le grandezze relative alla persona, definite in seguito come "parametri soggettivi":
  - L'isolamento termico del vestiario indossato dalla persona I_{cl};
  - L'intensità dell'attività fisica svolta dalla persona, ovvero il metabolismo energetico M.

I parametri ambientali possono essere facilmente determinati grazie all'utilizzo di un'apposita centralina microclimatica (*Figura 1.2.1*) mentre i parametri soggettivi devono essere valutati facendo riferimento alle metodologie proposte dalle relative norme tecniche [21] ovvero la UNI EN ISO 8996 [20] e la UNI EN ISO 9920 [26].

Figura 1.2.1 Centralina microclimatica per la valutazione dei parametri fisici microclima

Per poter garantire una condizione di comfort termico, indipendentemente dai valori assunti dai parametri ambientali e soggettivi, l'organismo umano deve poter mantenere l'equilibrio termico con l'ambiente circostante e contemporaneamente la propria *temperatura intera*[4] entro un limite di 37 ± 1 °C [3;5;7] e ciò è possibile attraverso una serie di processi fisiologici regolati dal *sistema di termoregolazione ipotalamico*[5] [3;7]. Nello specifico, qualora la temperatura corporea ecceda tale range, i principali processi fisiologici in grado di favorire la dispersione del calore sono la vasodilatazione periferica e la sudorazione mentre quelli che subentrano nel caso in cui la temperatura interna sia inferiore ai 36 °C sono la vasocostrizione ed il meccanismo della termogenesi con brivido [7]. Qualora tali meccanismi fisiologici non siano in grado di mantenere la temperatura interna entro tali limiti, l'organismo può mettere aumentare o ridurre la produzione di calore endogeno attraverso una serie di meccanismi "comportamentali", tra cui la riduzione del movimento e dell'abbigliamento, la ricerca dell'ombra o l'apertura di una finestra [5;7].

Un'attivazione intensa e prolungata dei meccanismi fisiologici di termoregolazione può portare al cedimento del sistema di termoregolazione ipotalamico [7] e favorire lo sviluppo di patologie da alte o basse temperature [3;7;13], soprattutto nei *soggetti ipersensibili*[6] all'ambiente termico [7]. Infatti tali patologie sono molto spesso causate da condizioni di stress termico indotte dal progressivo innalzamento o abbassamento della temperatura corporea causato dall'incapacità del corpo di mantenere la temperatura corporea entro i normali limiti fisiologici. Ad esempio, durante un'attività fisica intensa in un ambiente caldo, il sistema cardiovascolare può trovarsi in una condizione di sovraccarico tale da non consentire un'adeguata dissipazione del calore attraverso i processi di vasodilatazione portando di conseguenza un aumento della temperatura interna [7]. In particolare, al superamento dei 38 °C le funzioni fisiche e cognitive del corpo iniziano a diminuire [5] mentre un'eccessiva vasodilatazione può portare alla sincope da calore, una patologia caratterizzata da ipotensione e insufficiente afflusso sanguigno cerebrale che può manifestarsi con perdita di coscienza e ipertermia fino a 39 °C [3;5;7]. Invece, una condizione più grave a quella appena descritta è l'esaurimento della termoregolazione, la quale è contraddistinta dall'innalzamento della temperatura centrale oltre i 40,5 °C e dall'arresto della sudorazione [3;5;7] e che può portare a sintomi quali agitazione, tachicardia e/o ipotonia muscolare e, nei casi peggiori, a

---

[4] <u>*Temperatura interna:*</u> la temperatura intera del corpo rappresenta la temperatura media del nucleo corporeo, il quale comprende gli organi vitali dell'addome (ossia il fegato e i reni), del torace (ossia il cuore e i polmoni) ed il cervello [3;13].

[5] <u>*Sistema di termoregolazione ipotalamico:*</u> il sistema di termoregolazione ipotalamico è il sistema regolato dall'ipotalamo che permette al corpo di mantenere la temperatura corporea costante mediante la modifica dei processi fisiologici che consento di disperdere o aumentare la produzione di calore [7]. L'ipotalamo è in grado di integrare le informazioni provenienti dai termorecettori profondi centrali e dai termorecettori periferici sensibili al caldo e al freddo (ossia i corpuscoli di Ruffini ed i corpuscoli di Krause) e, a seconda delle necessità, modulare la risposta degli effettori periferici tramite un meccanismo di controllo nervoso a *feed-back* [7;14]

[6] <u>*Soggetti ipersensibili:*</u> i soggetti particolarmente sensibili all'ambiente termico sono coloro che, a causa di fattori aggravanti quali età e patologie preesistente sono maggiormente esposte al rischio microclimatico. Oltre alle donne in stato di gravidanza, i minori [7;16] e gli anziani [7], tra gli ipersensibili rientrano le persone affette da patologiche cardiovascolari (es. persone ipertese e cardiopatiche), metaboliche (es. persone diabetiche), renali e psicologiche, oltre a coloro che assumono regolarmente alcuni tipi di farmici in grado di alterare il normale funzionamento del sistema di termoregolazione ipotalamico, come quelli per ipertensione, disturbi della tiroide e della coagulazione [7].

convulsioni e perdita di coscienza, come nel caso del colpo di calore [7]. Ulteriori patologie tipicamente correlate allo svolgimento di attività lavorative in ambienti di lavoro caldi causate dall'eccessiva sudorazione e dall'inadeguato ripristino di liquidi e/o sali minerali sono il deficit sodico e idrico, le quali possono portare a sintomi come intensa sensazione di fatica, vertigini e crampi [7]. Invece, le patologie associate agli ambienti di lavoro freddi sono causate da una riduzione della temperatura corporea e si suddividono in patologie localizzate, come il congelamento delle estremità, e patologie sistemiche come nel caso dell'assideramento il quale può portare ad una progressiva riduzione delle funzioni vitali e la morte qualora la temperatura interna scenda al di sotto dei 32 °C [7].

La temperatura del corpo umano rappresenta quindi un importante indicatore delle condizioni di comfort/discomfort e dello stress termico a cui un individuo è sottoposto [3] le quali non soltanto dipendono dai processi fisiologici dell'organismo, ma anche dagli scambi termici che avvengono tra la persona e l'ambiente circostante [5;7;15]. Tali scambi termici possono avvenire per convezione, evaporazione, irraggiamento e, seppur in misura minore, per conduzione tramite la superficie cutanea ed evaporazione e convezione durante la respirazione [5;7;15] e dipendono oltre che dalle condizioni ambientali, anche da una serie di altri fattori, tra cui la tipologia di attività svolta, l'isolamento termico dell'abbigliamento indossato [5;7;15] e lo *stato di acclimatamento dell'individ*uo[7] [5]. Il primo a trovare una correlazione tra i parametri ambientali e soggettivi, gli scambi termici tra la persona e l'ambiente circostante e la sensazione termica provata dall'individuo è stato *P.O. Fanger* [15], il quale riuscì a definire la variazione di energia interna S per unità di tempo attraverso la formulazione dell'equazione di bilancio energetico [7;15;18], vale a dire:

$$S = M - W \pm C_{res} \pm E_{res} \pm K \pm C \pm R - E \tag{1.1}$$

In tale equazione i singoli termini possono avere segno positivo o negativo a seconda che rappresentino un guadagno o una perdita di energia [7] e nello specifico rappresentano:

- S rappresenta la variazione di energia interna nell'unità di tempo, ovvero la potenza termica accumulata o dissipata dal corpo umano [W/m^2];
- M rappresenta il metabolismo energetico [W/m^2] ossia l'energia sviluppata nell'unità di tempo dai processi ossidativi che avvengono all'interno dell'organismo necessari al corretto mantenimento delle funzioni vitali e allo svolgimento delle attività fisiche [15;19]. I valori di riferimento ed i metodi con cui tale parametro può essere valutato vengono definiti dalla norma UNI EN ISO 8996 [20];
- W rappresenta la potenza meccanica necessaria allo svolgimento del lavoro meccanico esterno [W/m^2] ossia l'energia complessiva richiesta dal corpo per superare la resistenza del carico [15;18]. Dal momento

[7] <u>*Stato di acclimatamento dell'individuo:*</u> l'acclimatazione rappresenta una condizione di adattamento fisiologico che consente di ridurre lo stress termico a cui la persona è sottoposta e la sensazione di disagio provata. La procedura di acclimatamento prevede un'esposizione all'ambiente termico specifica, graduale e controllata di almeno 2 ore al giorno per 7-14 giorni [17] durante i quali si assiste ad un miglioramento delle capacità di termoregolazione dell'individuo, ad esempio in un ambiente caldo tramite l'aumento della sudorazione e della frequenza cardiaca [5:17]. L'acclimatamento si mantiene per alcuni giorni dopo l'interruzione dell'attività lavorativa e non è più garantito dopo circa 1 settimana [17].

che l'uomo può essere visto come una macchina termica a basso rendimento che per compiere lavoro necessita di energia termica e poiché tale energia viene principalmente dissipata nell'ambiente sottoforma di calore [15], nell'equazione di bilancio energetico W risulta nettamente inferiore rispetto agli altri termini e pertanto può essere trascurato [18];

- C_{res} rappresenta la potenza termica scambiata durante la respirazione per convezione [W/m^2] la quale può essere determinata in funzione della temperatura dell'aria inalata e del metabolismo energetico M secondo la relazione [15;18]

$$C_{res} = 0{,}0014 \times M \times (34 - t_a) \tag{1.2}$$

- E_{res} rappresenta la potenza termica scambiata durante la respirazione per evaporazione [W/m^2] la quale può essere determinata in funzione della pressione parziale dell'aria p_a e del metabolismo energetico M secondo la relazione [15;18]

$$E_{res} = 1{,}7 \times 10^{-5} \times M \times (5867 - p_a) \tag{1.3}$$

- K rappresenta la potenza termica scambiata attraverso la pelle per conduzione [W/m^2] la quale può essere determinata in funzione del metabolismo energetico M, della potenza meccanica W e dalla pressione parziale dell'aria p_a secondo la relazione [18]

$$K = 3{,}05 \times 10^{-3} \times [5733 - 6{,}99 \times (M - W) - p_a] \tag{1.4}$$

- C rappresenta la potenza termica scambiata attraverso la pelle per convezione [W/m^2] dovuta alla differenza di temperatura dell'aria t_a e la temperatura superficiale dell'abbigliamento t_{cl} [15;18]. Noto il coefficiente di scambio termico convettivo h_c e il fattore d'area dell'abbigliamento f_{cl}, lo scambio termico convettivo può essere valutato secondo la relazione [15;18]

$$C = f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} - t_a) \tag{1.5}$$

- R rappresenta la potenza termica scambiata attraverso la pelle per irraggiamento [W/m^2] tra la superficie della persona (pelle e vestiti) e le superfici circostanti come finestre, muri e superfici calde [15]. Noto il fattore d'area dell'abbigliamento f_{cl}, la temperatura superficiale dell'abbigliamento t_{cl} e la temperatura media radiante t_r, lo scambio termico per irraggiamento può essere valutato secondo la relazione [15;18]

$$R = 3{,}96 \times 10^{-8} \times f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] \tag{1.6}$$

- E rappresenta la potenza termica ceduta per evaporazione (traspirazione e sudorazione) [W/m^2] è può essere determinata in funzione del metabolismo energetico M e della potenza meccanica W attraverso la seguente relazione [15]:

$$E = 0{,}42 \times [(M - W) - 58{,}15] \tag{1.7}$$

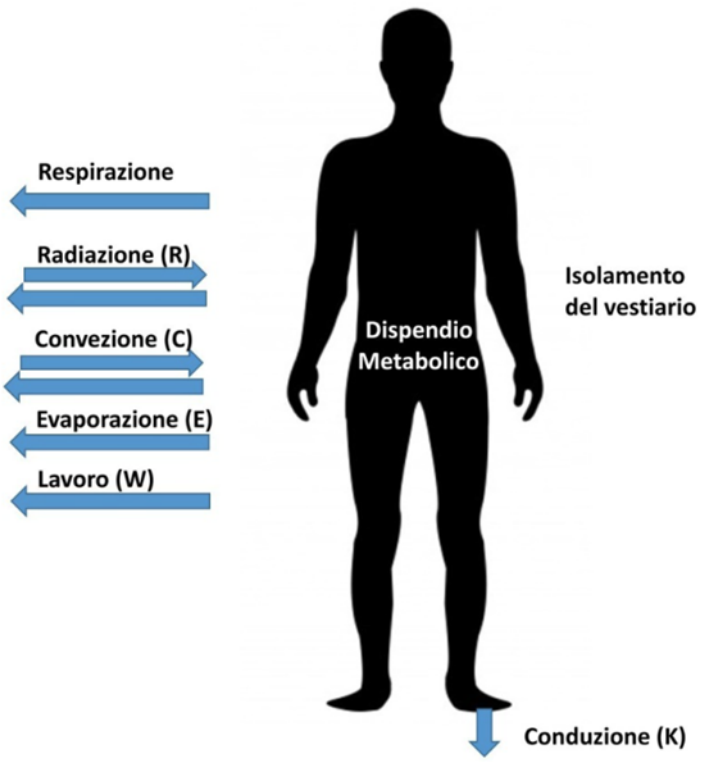


Figura 1.2.2: Scambi termici del corpo umano con l'ambiente [23]

A seconda del risultato assunto dall'equazione di bilancio energetico e quindi dall'entità degli scambi termici che avvengono tra la persona e l'ambiente, la sensazione termica provata dall'individuo potrà essere [7]:

- Nel caso in cui S = 0, la variazione di energia all'interno del corpo è nulla e pertanto la sensazione termica provata dall'individuo è quella comfort termico poiché a tale condizione coincide l'equilibrio termico tra la persona e l'ambiente circostante [7];
- Nel caso in cui S > 0, la potenza termica in ingresso nel corpo è maggiore di quella in uscita poiché il corpo non è in grado di dissipare il calore alla stessa velocità con la quale questo viene generato e/o assorbito dall'ambiente circostante [7]. In tali condizioni la persona proverà una sensazione di discomfort caldo a causa dell'aumento della temperatura corporea e che se eccessivo può favorire l'insorgere di patologie legate alle alte temperature [7];
- Nel caso in cui S < 0, la potenza termica in ingresso nel corpo è minore di quella in uscita poiché il corpo non è in grado di generare e/o assorbire calore alla stessa velocità con la quale questo viene disperso nell'ambiente circostante [7]. In tali condizioni la persona proverà una sensazione di discomfort freddo a causa dell'abbassamento della temperatura corporea e che se eccessivo può favorire l'insorgere di patologie legate alle basse temperature [7].

Tuttavia, per poter valutare l'esposizione all'ambiente termico a cui è sottoposto l'individuo è necessario innanzitutto identificare la tipologia di ambiente termico in cui si trova la persona [21] poiché nonostante i metodi d'analisi e le relative norme tecniche facciano riferimento all'equazione di bilancio energetico, queste si differenziano in funzione dell'ambiente termico in esame [7;12;21]. Infatti, a seconda della presenza o meno

di eventuali vincoli posti dall'attività lavorativa, come ad esempio quelli legati alle condizioni termo-igrometriche, all'abbigliamento e/o alla tipologia di attività svolta [12;21;23], gli ambienti vengono ad essere suddivisi in:

- **Ambienti termicamente moderabili**, ovvero quegli ambienti nei quali non esistono vincoli in grado di pregiudicare il raggiungimento delle condizioni di comfort termico [12], come ad esempio gli uffici. Pertanto, in tale tipologia di ambienti l'obiettivo da perseguire è il raggiungimento di una condizione di comfort, secondo quanto indicato all'*Allegato IV* del d.lgs 81/08 [12;16];
- **Ambienti termicamente vincolati**, definiti anche come ambienti termici severi caldi o severi freddi, sono quegli ambienti in cui esistono dei vincoli legati alle necessità produttive e/o alle condizioni ambientali che non consentono di perseguire la condizione di comfort [7;12;21] e tali da sollecitare eccessivamente il sistema di termoregolazione dell'individuo [5;7]. Pertanto, in tale tipologia di ambienti l'obiettivo da porsi è quello della salvaguardia della salute e della sicurezza dei lavoratori e sarà quindi necessario adottare delle misure di carattere tecnico e/o organizzativo atte alla salvaguardia della salute e la sicurezza [5;16]. Il riferimento legislativo per la valutazione degli ambienti termici vincolati è il *Titolo VIII, Capo I* del d.lgs 81/08 [12;16], tuttavia la legge non contiene alcuna indicazione relativa ai metodi mediante i quali verificare la presenza e valutare lo stress termico [12]. Alcuni esempi di ambienti di lavoro che possono essere classificati come ambienti severi sono le fonderie, le acciaierie, le industrie della ceramica, le vetrerie industriali, i cantieri edili, le attività agricole o le celle frigorifere del settore alimentare.

Indipendentemente dalla tipologia di ambiente termico ed in tutti i casi in cui sia tecnicamente possibile, il datore di lavoro è tenuto ad adottare una o più misure di natura tecnica, organizzativa o procedurale [7] al fine di garantire che le condizioni microclimatiche degli ambienti di lavoro siano il più possibile prossime alle condizioni di benessere termico [7;12]. Tuttavia, se negli ambienti moderabili non esistono vincoli in grado di compromettere il raggiungimento della condizione di comfort, ciò non è sempre vero negli ambienti termicamente vincolati poiché in questi sono presenti delle condizioni relative ai paramenti ambientali e/o soggettivi tali da compromettere il raggiungimento della condizione di comfort termico. Pertanto, al fine di garantire la salute e la sicurezza dei lavorativi negli ambienti severi caldi o freddi, il datore di lavoro dovrà adottare, a seconda della tipologia di ambiente termico e dell'attività svolto, una o più delle seguenti azioni di prevenzione e protezione [7;12;22]:

- **Negli ambienti severi caldi indoor e outdoor**, il datore di lavoro dovrà:
  - Garantire la disponibilità e rendere facilmente accessibile acqua fresca potabile ed incoraggiare i lavoratori a bere frequentemente [12;22], soprattutto durante le ondate di calore qualora l'attività lavorativa si svolga in un ambiente outdoor [22]. La somministrazione di acqua dovrebbe può inoltre essere accompagnata dall'assunzione di sali minerali al fine di reintegrare quelli persi durante la sudorazione [12;23];

- Ridurre l'emissività delle superfici calde attraverso interventi di coibentazione diretta o, qualora ciò non sia possibile, posizionare dei pannelli protettivi riflettenti e/o parzialmente assorbenti in grado di limitare l'esposizione diretta dell'individuo alla radiazione emessa dalla superficie [7;8;22]. Qualora non sia possibile impedire l'esposizione dirette dalla sorgente radiante, il datore di lavoro dovrà fornire ai lavoratori, a seconda della tipologia di mansione svolta, un abbigliamento riflettente e idonei dispositivi di protezione individuale [22];
- Meccanizzare il più possibile le fasi lavorative e fornire ai lavoratori le attrezzature necessarie per limitare le attività lavorative pesanti al fine di ridurre la produzione di calore endogeno associato allo svolgimento delle mansioni [22];
- Adottare un adeguato sistema di ventilazione in prossimità della sorgente di calore in grado di estrarre grandi volumi d'aria calda e sostituirli con aria più fredda [8;12;22] in modo tale da stemperare la temperatura dell'aria in prossimità delle sorgenti calde [12]. In alternativa possono essere adottati sistemi in grado di aumentare la ventilazione dell'aria e/o ridurre l'umidità [5;8;12] in modo tale da favorire gli scambi termici evaporativi che avvengono attraverso la sudorazione [12]. Possono inoltre essere adottati altri sistemi di carattere ingegneristico come l'inserimento di elementi ad acqua o la costruzione di murature ad elevata inerzia termica [5];
- Limitare la durata dell'esposizione all'ambiente caldo predisponendo delle aree climatizzate in cui poter effettuare le pause di lavoro e di recupero termico [22] e/o installando, in prossimità di grandi sorgenti di calore come forni e laminatoi, delle cabine climatizzate isolate termicamente dall'ambiente circostante al fine di ridurre la permanenza negli ambienti severi caldi ai soli "tempi tecnici" [12];
- Prevedere, in relazione all'ambiente termico ed alla tipologia di attività svolta, un programma di acclimatamento per i lavorati in ambienti caldi della durata di 7 - 14 giorni [7;17;22] in modo tale da ridurre il rischio di insorgenza di patologie legate allo stress termico [12;17];
- Durante lo svolgimento di attività lavorative in ambienti caldi outdoor sarà necessario, soprattutto durante il periodo estivo, predisporre aree all'ombra per ridurre l'esposizione al calore radiante del sole [8] ed organizzare i turni di lavoro facendo in modo che le mansioni dal punto di fisico più impegnative vengano svolte durante le ore più fresche della giornata (ad esempio durante le prime ore del mattino o nel tardo pomeriggio) e/o alternare i turni tra i lavoratori [8;22];
- Organizzare un percorso di formazione ed informazione sullo stress termico [12;22] volto al riconoscimento delle patologie da alte temperature (come i crampi, la sincope ed il colpo di calore) e l'insegnamento delle procedure da seguire qualora si manifestino i sintomi di tali patologie [22]. Inoltre, tali corsi dovrebbero insegnare le procedure da adottare per ridurre il rischio, tra cui il corretto utilizzo dell'abbigliamento protettivo ed il riconoscimento dei fattori in grado di influenzare la tolleranza dell'individuo allo stress termico, come la presenza di patologie pregresse (malattie cardiovascolari, metaboliche, etc.), l'assunzione di alcol e farmaci in grado di alterare il normale funzionamento del sistema di termoregolazione [5;22];

- **Negli ambienti severi freddi indoor e outdoor**, il datore di lavoro dovrà:

- Fornire ai lavoratori l'abbigliamento [12] e i dispositivi di protezione individuale aventi caratteristiche di isolamento termico adeguate alle condizioni microclimatiche dell'ambiente, come guanti e berretti antifreddo [22];
- Installare delle cabine climatizzate e ben isolate dall'ambiente termico circostante in modo tale da ridurre la permanenza negli ambienti severi freddi ai soli "tempi tecnici" [12];
- Definire il tempo massimo di permanenza negli ambienti freddi, il numero e la durata delle pause termiche [121] in modo da ridurre il rischio d'insorgenza di patologie da basse temperature. In particolare le pause termiche devono avvenire in un ambiente termicamente neutro, possibilmente climatizzato e lontano da dove si svolgono le attività lavorative [12;22];
- Negli ambienti severi freddi indoor, gli impianti di raffreddamento dovranno essere realizzati facendo in modo che la velocità dei flussi d'aria sia mantenuta ai livelli più bassi possibili [12;22] e che questi vengano direzionati in aree non presidiate dai lavoratori e/o si possano interrompere durante l'accesso in tali aree [12];
- Predisporre un percorso di acclimatamento controllato nei tempi e nei parametri termo-igrometrici tra l'ambiente di lavoro freddo e l'esterno in modo da ridurre gli sbalzi termici [12];
- Durante lo svolgimento di attività lavorative in ambienti freddi outdoor, soprattutto durante il periodo invernale, organizzare i turni di lavoro solo nel periodo diurno (dalle 8 alle 17) e predisporre, ove possibile, dei ripari dal vento e dalla pioggia [22];
- Organizzare un percorso di formazione ed informazione dei lavoratori [12;22] volto all'insegnamento dei problemi di salute causati dalle basse temperature (come il congelamento delle estremità e assideramento), delle condizioni di suscettibilità individuale in grado di influenzare lo stress termico [22] e dell'importanza del corretto uso dell'abbigliamento protettivo e dei dispositivi di protezione individuali. Inoltre, tali corsi dovrebbero insegnare l'importanza di asciugarsi regolarmente il sudore e a riconoscere i sintomi premonitori, come giramenti di testa, spossatezza e bruciore della pelle [22].

CAPITOLO 2

IL QUADRO NORMATIVO

Le metodologie di valutazione del rischio microclimatico

2.1: La valutazione del rischio microclimatico secondo il d.lgs 81/08

Il principale riferimento normativo italiano atto a regolamentare la tutela della salute e della sicurezza dei lavoratori nei luoghi di lavoro è il Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n.81 (d.lgs 81/2008) [16], anche detto Testo Unico per la sicurezza sul lavoro. Tale decreto si applica, come stabilito al *Titolo I, Capo I, Articolo 3* [16], *"... a tutti i settori di attività, privati e pubblici ..."* ed indica al *Titolo I, Capo III, Articolo 17* [16] tra gli obblighi non delegabili del datore di lavoro, oltre alla nomina del responsabile del servizio di prevenzione e protezione dai rischi (RSPP), la valutazione di tutti i rischi presenti nell'ambiente lavorativo. A seguito di tale valutazione, il datore di lavoro ha l'obbligo di procedere all'elaborazione, come previsto al *Titolo I, Capo III, Articolo 28* [16], del Documento di Valutazione dei Rischi per la salute e sicurezza (DVR), il quale dovrà contenere oltre alla data di sottoscrizione del documento:

a) Le firme del datore di lavoro, del responsabile del servizio di prevenzione e protezione (o del rappresentante dei lavoratori per la sicurezza territoriale), del rappresentante dei lavoratori per la sicurezza e del medico competente;
b) La relazione di valutazione di tutti i rischi per la salute e la sicurezza presenti durante lo svolgimento dell'attività lavorativa;
c) Le misure di prevenzione e protezione attuate ed i dispositivi di protezione adottati a seguito della valutazione dei rischi;
d) Il programma delle misure di prevenzione e protezione ritenute opportune per garantire il miglioramento nel tempo dei livelli di sicurezza;
e) Le procedure di attuazione delle misure da realizzare e le figure aziendali che vi dovranno provvedere;
f) I nominativi del responsabile del servizio di prevenzione e protezione, del rappresentante dei lavoratori per la sicurezza (o del rappresentante dei lavoratori per la sicurezza territoriale) e del medico competente;
g) L'individuazione di eventuali mansioni che espongono i lavoratori a rischi specifici e che richiedono una specifica capacità professionale

Tra rischi che il datore di lavoro ha l'obbligo di valutare vi sono, come sancito al *Titolo VIII Capo I, Articolo 181, comma 1* [16], i rischi da agenti fisici, ovvero i rischi identificati al *Titolo VIII, Capo I, Articolo 180* [16], vale a dire:

- Il rumore;
- Gli ultrasuoni e gli infrasuoni;
- Le vibrazioni meccaniche;
- I campi elettromagnetici;
- Le radiazioni ottiche di origini artificiale;
- Il microclima
- Le atmosfere iperbariche;
- Le radiazioni ionizzanti

Agente fisico	Riferimento legislativo
Rumore	d.lgs 81/08 e s.m.i. (Titolo VIII, Capo I; Titolo VIII, Capo II)
Ultrasuoni e Infrasuoni	d.lgs 81/08 e s.m.i. (Titolo VIII, Capo I)
Vibrazioni	d.lgs 81/08 e s.m.i. (Titolo VIII, Capo I; Titolo VIII, Capo III)
Campi elettromagnetici	d.lgs 81/08 e s.m.i. (Titolo VIII, Capo I; Titolo VIII, Capo IV)
Radiazioni ottiche artificiali	d.lgs 81/08 e s.m.i. (Titolo VIII, Capo I; Titolo VIII, Capo V)
Microclima	d.lgs 81/08 e s.m.i. (Titolo VIII, Capo I)
Atmosfere iperbariche	d.lgs 81/08 e s.m.i. (Titolo VIII, Capo I)
Radiazioni ionizzanti	d.lgs 230 del 17 marzo 1995 e s.m.i.

Tabella 2.1.1: Riferimento legislativo per la valutazione di ciascun agente fisico [12;16]

Pertanto, la valutazione del rischio connessa agli agenti fisici è da considerarsi parte integrante del DVR e dovrà essere supportata da una relazione tecnica [24] redatta, come sancito indicato al *Titolo VIII Capo I, Articolo 181*, *comma* 2 [16], da personale qualificato (ossia da personale in possesso di specifiche conoscenze in materia) e con cadenza almeno quadriennale o qualora vi siano dei mutamenti all'interno del contesto aziendale che possano renderla obsoleta. Tali tipologie di valutazione dei rischi, oltre a tener conto delle caratteristiche del luogo di lavoro, delle condizioni di esposizione, della tipologia e posizione delle sorgenti d'emissione [16], dovrà riportare anche:

a) La data in cui è stata condotta la valutazione e le schede tecniche delle misurazioni;
b) I dati identificativi del personale che ha condotto la valutazione del rischio da agente fisico, del medico competente (se previsto ai sensi degli articoli 41 e 185 del d.lgs 81/08), del RLS (o in sua assenza dei lavoratori consultati ai sensi dell'art. 50, comma 1);
c) L'elenco delle mansioni ed eventuali gruppi omogenei di lavoratori espositi al rischio fisico;
d) I criteri con cui è stata condotta la valutazione del rischio;
e) L'elenco delle sorgenti riconducibili agli agenti fisici, una planimetria indicante la posizione della sorgente, la valutazione specifica effettuata tramite misurazioni e/o calcoli, la valutazione dell'efficacia dei dispositivi di protezione già messi in atto ed i rischi per le persone ipersensibili al rischio;
f) Il programma delle misure tecniche, organizzative e procedurali che dovranno essere adottate al fine di eliminare o, qualora ciò non sia possibile, ridurre il rischio da esposizione all'agente fisico.

Tuttavia, a differenza di agenti fisici quali il rumore, le vibrazioni, i campi elettromagnetici e le radiazioni ottiche artificiali, per l'agente fisico microclima il d.lgs 81/08 non fornisce alcuna indicazione in merito alle modalità di svolgimento della valutazione del rischio o eventuali valori limite di temperatura e umidità. Tuttavia, il decreto afferma al *Titolo II, Capo I, Articolo 63, comma 1* [16] che per poter garantire la salute e la sicurezza dei lavorati, i luoghi di lavoro devono rispettare tutti i requisiti strutturali e non contenuti

all'*Allegato IV* [16] che nel caso delle condizioni microclimatiche riguardano la ventilazione (1.9.1), la temperatura (1.9.2) e l'umidità (1.9.3). In particolare, il datore di lavoro dovrà garantire i seguenti requisiti:

- Nei luoghi di lavoro chiusi i lavoratori dispongano di aria salubre ottenuta tramite aperture naturali o, qualora ciò non sia possibile, tramite un impianto d'areazione [16];
- La temperatura nei locali di lavoro sia adeguata all'organismo umano tenendo in considerazione i processi produttivi applicati e gli sforzi fisici imposti ai lavoratori. Nel caso in cui ciò non sia tecnicamente possibile (come nel caso delle celle frigo) o non sia economicamente fattibile modificare la temperatura in tutto l'ambiente (come nel caso di capannoni di grandi dimensioni), il datore di lavoro deve salvaguardare i lavorati dalle temperature troppo alte o troppo basse tramite l'attuazione di misure tecniche localizzate e/o organizzative o in alternativa mediante dispositivi di protezione individuale [16];
- Nei locali chiusi di lavoro, la temperatura e l'umidità dovranno essere mantenute a valori tali da evitare la formazione di nebbie [16].

Sebbene quindi il Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n.81 dichiari che è obbligo del datore di lavoro valutare tutti i rischi compresi i rischi legati agli agenti fisici, tuttavia esso non fornisce alcuna indicazione in merito alle metodologie d'analisi che devono essere adottate ai fini della valutazione del rischio dell'agente fisico "microclima". Pertanto, dopo aver identificato la tipologia di ambiente termico oggetto della valutazione [21], per poter eseguire correttamente la valutazione quantitativa del rischio microclimatico nei luoghi di lavoro sarà necessario fare riferimento alle relative norme tecniche internazionali, ovvero:

- Per la valutazione degli ambienti moderati si fa riferimento alla norma UNI EN ISO 7730 [18];
- Per la valutazione degli ambienti severi caldi si fa riferimento alle norme UNI EN ISO 7243 [35] e UNI EN ISO 7993 [36];
- Per la valutazione degli ambienti severi freddi si fa riferimento alla norma UNI EN ISO 11079 [38].

2.2 La valutazione degli ambienti moderabili – La norma UNI EN ISO 7730

Per poter eseguire la valutazione delle condizioni microclimatiche negli ambienti moderabili, ossia in quegli ambienti in cui non sono presenti vincoli legati alle necessità produttive o alle condizioni ambientali tali da pregiudicare il raggiungimento della condizione di comfort termico [21], il d.lgs 81/08 [16] non definisce alcuna metodologia di analisi né tanto meno dei valori limiti di temperatura, umidità e pressione dell'aria. Pertanto, per poter eseguire un'analisi analitica è necessario fare riferimento alla norma tecnica UNI EN ISO 7730 [21], la quale prevede di valutare l'ergonomia termica tramite l'analisi del "Voto medio previsto" PMV (Predicted Mean Vote), della "Percentuale di insoddisfatti" PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) e dei criteri di discomfort termico locale.

Secondo la norma UNI EN ISO 7730 [21], la sensazione termica provata dall'individuo dipende dagli scambi termici che avvengono tra la persona e l'ambiente circostante e dunque dall'equazione di bilancio energetico [7;18]; pertanto ai fini della valutazione sarà necessario determinare i parametri ambientali e soggettivi:

- Parametri Ambientali: ovvero la temperatura dell'aria t_a, la temperatura media radiante t_r, la velocità dell'aria v_{ar} e l'umidità dell'aria (espressa come pressione parziale di vapor d'acqua p_a) [18], necessari alla caratterizzazione dell'ambiente termico in esame;
- Parametri Soggettivi: sono il metabolismo energetico M e l'isolamento termico dell'abbigliamento I_{cl} [18;21], i quali servono ad identificare l'intensità dell'attività compiuta dall'individuo ed il suo abbigliamento.

Una volta determinati tali parametri è possibile definire il giudizio medio potenzialmente espresso e la percentuale di persone termicamente insoddisfatte delle condizioni microclimatiche presenti, rispettivamente tramite la valutazione degli indici di discomfort globale PMV e PPD, e delle condizioni di disagio termico locale mediante gli indici di discomfort locale. Una volta determinati tali indici, a seconda della destinazione d'uso, un ambiente potrà ritenersi termicamente confortevole soltanto se questi rientrano nei limiti di una delle tre *categorie di benessere termico*[8] [18;21]. In particolare, poiché alla categoria B corrisponde il livello da perseguire in fase di progettazione, un ambiente moderabile è da ritenersi termicamente confortevole secondo la norma UNI EN ISO 7730 [21] qualora vengano soddisfatti i seguenti criteri di comfort globale e locali, ovvero:

- Il PMV risulta in valore assoluto pari o inferiore a 0,5 e dunque tale da mantenere il PPD ad un livello pari o inferiore al 10 %

[8] *Categorie di benessere termico*: le categorie di benessere termico A, B e C definite dalla norma UNI EN ISO 7730 [21] fanno riferimento ai quattro intervalli di comfort termico raccomandati nella EN ISO 16798 [12;18], infatti tra le categorie A, B e C vi è una corrispondenza biunivoca rispettivamente con la categoria I (ovvero il livello che deve essere adottato in presenza di soggetti particolarmente sensibili alle condizioni termiche), la categoria II (ovvero il livello da perseguire in fase di progettazione) e III (ovvero il livello che consente il mantenimento di condizioni termicamente accettabili anche se con alcuni limiti di performance).

- Ciascuno dei fattori di discomfort locale si trovi all'interno degli intervalli definiti e sia pertanto tale da mantenere la relativa percentuale di insoddisfatti inferiore alla PD massima raccomandata

Categoria	Indici di Comfort Globale		Indici di Discomfort Locale			
	PPD %	PMV	DR %	PD %		
				Diff. Verticale di Temperatura	Temperatura pavimento	Asimmetria Radiante
A	< 6%	-0,2< PMV < 0,2	< 10	< 3	< 10	< 5
B	< 10%	-0,5 < PMV < 0,5	< 20	< 5	< 10	< 5
C	< 15%	-0,7 < PMV < 0,7	< 30	< 10	< 15	< 10

Tabella 2.2.1: Classificazione delle categorie degli ambienti termici [18]

2.2.1 La valutazione del discomfort globale: il metodo PMV e PPD

In un ambiente moderabile, l'obiettivo da perseguire è quello del raggiungimento della condizione di comfort termico poiché in tale tipologia di ambienti non sono presenti vincoli ad esempio legati alle esigenze produttive tali da impedire l'adozione di interventi di natura tecnica, organizzativa o procedurale che possano rendere l'ambiente confortevole [7]. Nello specifico, in un ambiente termicamente confortevole la variazione di energia interna S dovrà essere nulla e pertanto, secondo la "Equazione del Comfort" definita da dal *P.O. Fanger* [15], dovrà essere rispettata la seguente relazione

$$M - W = C_{res} + E_{res} + K + C + R + E \tag{2.1}$$

e che, in funzione dei paramenti ambientali e soggettivi, può riscritta come segue

$$\begin{gathered} M - W = 3{,}05 \times 10^{-3} \times [5733 - 6{,}99 \times (M - W) - p_a] + 0{,}42 \times [(M - W) - 58{,}15] + \\ 1{,}7 \times 10^{-5} \times M \times (5867 - p_a) + 0{,}0014 \times M \times (34 - t_a) + \\ 3{,}96 \times 10^{-8} \times f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} - t_a) \end{gathered} \tag{2.2}$$

dove:

- M rappresenta il metabolismo energetico [W/m^2], ottenuto secondo la UNI EN ISO 8996 [20]
- W rappresenta la potenza meccanica impegnata per compiere lavoro meccanico [W/m^2]
- I_{cl} rappresenta l'isolamento termico dell'abbigliamento [m^2 K/W], ottenuto secondo la UNI EN ISO 9920 [26]
- f_{cl} rappresenta il coefficiente di area dell'abbigliamento [-], definito dalla relazione

$$f_{cl} = \begin{cases} 1{,}00 + 0{,}2\, I_{cl} & se\ I_{cl} < 0{,}5\ clo \\ 1{,}05 + 0{,}1\, I_{cl} & se\ I_{cl} > 0{,}5\ clo \end{cases} \tag{2.3}$$

- t_a rappresenta la temperatura dell'aria [°C]
- t_r rappresenta la temperatura media radiante [°C]
- v_{ar} rappresenta la velocità relativa dell'aria [m/s]

- p_a rappresenta la pressione parziale del vapor d'acqua [Pa]
- h_c rappresenta il coefficiente di scambio termico convettivo [W/m^2 K], definito dalle relazioni

$$h_c = \begin{cases} 2{,}38\,(t_{cl} - t_a)^{0{,}25} & se\ 2{,}38\,(t_{cl} - t_a)^{0{,}25} > 12{,}1\sqrt{v} \\ 12{,}1\,\sqrt{v} & se\ 2{,}38\,(t_{cl} - t)^{0{,}25} > 12{,}1\sqrt{v} \end{cases} \tag{2.4}$$

- t_{cl} rappresenta la temperatura superficiale dell'abbigliamento [°C] che, non essendo nota a priori, viene valutata mediante un processo interattivo a partire dall'equazione di bilancio termico applicata tra l'abbigliamento e l'ambiente esterno [42]. Infatti, poiché in regime stazionario il flusso di calore trasmesso per conduzione attraverso l'indumento dallo strato interno, la cui temperatura è pari a quella della pelle t_{sk}, allo strato esterno è pari alla somma dello scambio termico per convezione e per irraggiamento [42], la temperatura superficiale dell'abbigliamento può essere valutata facendo riferimento alla seguente relazione

$$t_{cl} = t_{sk} - I_{cl} \times \left\{ \begin{matrix} 3{,}96 \times 10^{-8} \times f_{cl} \times \\ [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} - t_a) \end{matrix} \right\} \tag{2.5}$$

dove la temperatura della pelle tsk è pari a

$$t_{sk} = 35{,}7 - 0{,}028 \times (M - W) \tag{2.6}$$

Facendo riferimento alle precedenti relazioni, il comfort termico viene raggiunto se, indipendentemente dalla combinazione dei parametri ambientali e soggettivi, la potenza termica prodotta dall'individuo eguaglia quella scambiata con l'ambiente circostante [15] e dunque se la variazione di energia interna S è nulla. Tuttavia, essendo la sensazione di comfort termico fortemente influenza dal sistema di termoregolazione dell'individuo [26], la percezione termica provata in un dato ambiente sarà una sensazione puramente soggettiva e pertanto difficilmente sarà possibile, sia per ragioni tecniche che economiche, realizzare un ambiente che possa essere definito "confortevole" da tutti i suoi occupanti [15]. Di conseguenza, poiché indipendentemente dalle condizioni termo-igrometriche di un ambiente sarà sempre presenta una percentuale di persone termicamente insoddisfatte, per poter valutare la sensazione termica la "Equazione del Comfort" di P.O. Fanger è stata generalizzata al fine di introdurre un indice in grado di determinare, attraverso una scala di sensazione termica a sette punti, il valore medio previsto della sensazione termica globale percepita da un gruppo numeroso di individui [18;21], ossia l'indice PMV.

Valore indice PMV	Sensazione Termica Prevista
+ 3	Molto caldo
+ 2	Caldo
+ 1	Leggermente caldo
0	Neutralità termica
- 1	Leggermente freddo
- 2	Freddo
- 3	Molto freddo

Tabella 2.2.2 Scala di sensazione termica a sette punti, tratta dalla UNI EN ISO 7730 [18]

Per poter definire l'indice PMV, la norma UNI EN ISO 7730 [18] consente di utilizzare uno dei seguenti approcci:

1) Tramite misurazione diretta utilizzando appositi sensori [15;18], come il *Thermal Comfort Meter, Type 1212* [15];
2) Utilizzando l'*Appendice E* [18] una volta nota l'intensità dell'attività svolta, l'isolamento termico dell'abbigliamento indossato, la *temperatura operativa*[9] e la velocità relativa;
3) Risolvendo l"Equazione del Comfort" generalizzata [18], tramite appositivi programmi o utilizzando il codice di calcolo fornito all'*Appendice D* [18].

Ai fini della valutazione microclimatica, viene normalmente adotta il terzo approccio il quale consente di determinare l'indice PMV a partire dalla differenza tra la potenza termica acquisita e dissipata dal corpo umano, ossia la variazione di energia interna S, secondo la seguente relazione:

$$PMV = \left[0{,}303 \times e^{(-0{,}036 \times M)} + 0{,}028\right] \times S \tag{2.7}$$

ovvero

$$PMV = \left[0{,}303 \times e^{(-0{,}036 \times M)} + 0{,}028\right] \times$$

$$\left\{\begin{array}{c} M - W - 3{,}05 \times 10^{-3} \times \left[5733 - 6{,}99 \times (M - W) - p_a\right] - \\ 0{,}42 \times [(M - W) - 58{,}15] - 1{,}7 \times 10^{-5} \times M \times \left(5867 - p_a\right) - 0{,}0014 \times M \times (34 - t_a) - \\ 3{,}96 \times 10^{-8} \times f_{cl} \times \left[(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4\right] - f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} - t_a) \end{array}\right\} \tag{2.8}$$

Tuttavia, dal momento che le precedenti relazioni sono state ottenuto a seguito di numerosi studi e prove sperimentali [15], il metodo di valutazione della sensazione termica globale presenta dei limiti di validità [18;21] e di conseguenza il metodo del PMV risulterà applicabile soltanto qualora:

a) L'ambiente è moderato, ossia quando il valore del PMV è compreso tra - 2 e + 2;
b) I quattro parametri ambientali (t_a, t_r, p_a e v_{ar}) e i due parametri soggettivi (M, I_{cl}) sono compresi negli intervalli riportati nella *Tabella 2.2.3*

Qualora i parametri ambientali e/o soggettivi non rientrino negli intervalli di validità, l'indice PMV non è più un indicatore efficace del comfort termico poiché, nel tentativo di mantenere la temperatura interna nei limiti fisiologici, il sistema di termoregolazione dell'individuo si trova in una condizione di sollecitazione significativa [21] e dunque in una condizione di "stress termico". Pertanto, poiché in tali condizioni possono manifestarsi dei rischi per la salute e la sicurezza dei lavoratori sarà necessario eseguire, in relazione alla tipologia di ambiente termico in esame, una valutazione più approfondita secondo le metodologie d'analisi proposte dalle norme UNI EN ISO 7243 [35], UNI EN ISO 7933 [36] e UNI EN ISO 11079 [38].

[9] <u>*Temperatura operativa t_o*</u>: rappresenta la temperatura uniforme di una cavità nera fittizia nella quale un occupante scambierebbe per irraggiamento e convezione la stessa quantità di energia termica che scambia nell'ambiente reale non uniforme [18] ed è pari alla media tra la temperatura dell'aria t_a e la temperatura media radiante t_r

Parametri		Intervallo di validità
Ambientali	Temperatura dell'aria (ta)	+ 10 °C ÷ 30 °C
	Temperatura media radiante (tr)	+ 10 °C ÷ 40 °C
	Velocità relativa dell'aria (var)	0 m/s ÷ 1 m/s
	Pressione parziale del vapor d'acqua (pa)	0 Pa ÷ 2700 Pa
Soggettivi	Metabolismo energetico (M)	46 W/m² ÷ 232 W/m²
	Isolamento termico dell'abbigliamento (Icl)	0 m² K/W ÷ 0,310 m² K/W

Tabella 2.2.3: Intervalli di applicabilità dei parametri ambientali e soggettivi nel calcolo del PMV [18]

In ogni caso, l'indice PMV rappresenta il valore medio previsto della sensazione termica globale che un gruppo numero di individui percepisce dell'ambiente termico in cui si trovano [18], tuttavia anche qualora l'ambiente termico sia confortevole i voti individuali saranno dispersi attorno al valore corrispondente. Pertanto, al fine di indentificare la percentuale di persone termicamente insoddisfatte, ossia quelle persone che in ambiente termico confortevole percepiscono una sensazione di discomfort caldo, molto caldo, freddo o molto freddo [15], è stato introdotto l'indice PPD. Tale indice può essere ricavato secondo la seguente relazione:

$$PPD = 100 - 95 \times e^{\left(-0{,}03353 \times PMV^4 - 0{,}2179 \times PMV^2\right)} \tag{2.9}$$

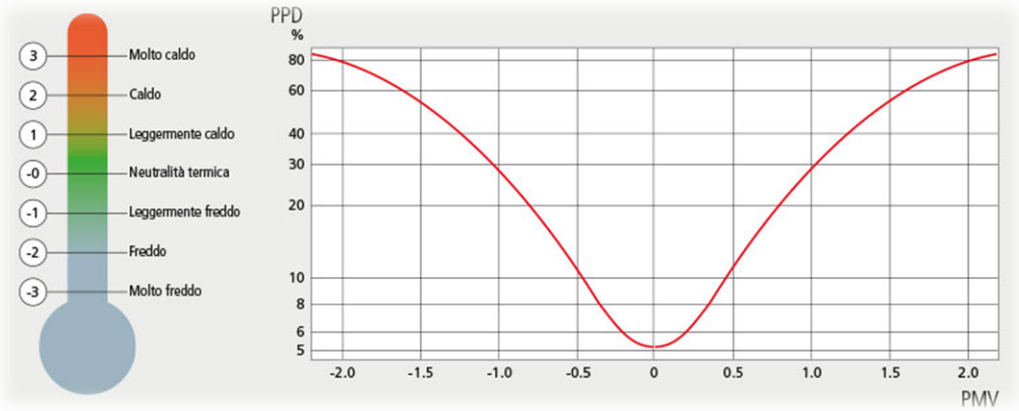


Figura 2.2.1: Percentuale prevista di insoddisfatti PPD in funzione del voto medio previsto PMV [26]

2.2.2 La valutazione del discomfort locale

La metodologia di valutazione degli indici PMV e PPD precedentemente descritta consente di determinare l'impatto termico globale dell'ambiente sul corpo umano nella sua interezza. Tuttavia tali indici non risultano idonei alla valutazione delle condizioni di disagio termico localizzato, riconducibili a fenomeni di surriscaldamento e/o raffreddamento indesiderati di specifiche aree corporee, quali gli arti superiori e inferiori, con particolare riferimento a mani e piedi [18;21]; pertanto, in un ambiente moderabile risulta necessario verificare anche che non siano presenti condizioni tali da indurre dei disagi termici localizzati [18]. Nello specifico, le condizioni che possono portare ad una condizione di discomfort termico localizzato sono:

1. **Correnti d'aria**: le correnti d'aria eccessivamente fredde o turbolente, specialmente in prossimità del collo [26], possono provocare nell'individuo una sensazione di discomfort, il quale viene espresso come percentuale di persone termicamente infastidite dalla corrente d'aria [18], ovvero DR. La percentuale DR aumenta all'aumentare della velocità locale relativa $v_{a,l}$ e della turbolenza dell'aria T_u (definita come il rapporto tra la *deviazione standard*[10] e la media della velocità dell'aria) mentre diminuisce all'aumentare della temperatura locale dell'aria $t_{a,l}$ secondo la relazione:

$$DR = (34 - t_{a,l})(\bar{v}_{a,l} - 0{,}05)^{0{,}62}(0{,}37 \times \bar{v}_{a,l} \times T_u + 3{,}14) \tag{2.10}$$

2. **Differenza verticale della temperatura dell'aria**: qualora in un dato ambiente vi sia una differenza di temperatura dell'aria tra la testa e le caviglie ($\Delta t_{a,v}$) superiori ai 2 °C [26], le persone possono provare una sensazione di disagio termico. La percentuale di insoddisfatti PD a causa del gradiente di temperatura sarà pari a [18;26]:

$$PD = \frac{100}{1 + e^{(5{,}76 - 0{,}56 \times \Delta t_{a,v})}} \tag{2.11}$$

3. **Pavimenti caldi e freddi:** nel caso in cui la temperatura del pavimento risultasse troppo alta o troppo bassa, le persone possono provare una sensazione di discomfort termico causato dalla sensazione provata dai propri piedi o dall'interno corpo qualora la persona si trovi distesa [18]. La percentuale di insoddisfatti PD a causa della temperatura del pavimento t_f sarà pari a:

$$PD = 100 - 94 \times e^{\left(-1{,}387 + 0{,}118 \times t_f - t_f^2\right)} \tag{2.12}$$

4. **Asimmetria radiale**: persone esposte ad un'asimmetria della temperatura radiante (Δt_{pr}) possono provare una sensazione di discomfort termico a causa della differenza di temperatura tra le pareti e/o finestre: la norma UNI EN ISO 7730 [18] individua 4 elementi (soffitto caldo, parete fredda, soffitto freddo, parete calda) che possono provocare una sensazione di discomfort e per ciascuno di essi verrà definito la seguente percentuale di insoddisfatti PD:

- **Asimmetria radiante dovuto alla presenza di un soffitto caldo**

$$PD = \frac{100}{1 + e^{(2{,}84 - 0{,}174 \times \Delta t_{pr})}} - 5{,}5 \tag{2.13}$$

[10] <u>*Deviazione Standard*</u> indica la dispersione di una distribuzione ed è pari alla radice della sommatoria di tutti gli scarti della media elevati al quadrato divisi per il numero totali di casi. Pertanto, la turbolenza T_u espressa in percentuale sarà pari a

$$T_u = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1}} \sum_{i=1}^{n} (v_{ai} - v_a)^2}{v_a} \times 100$$

- **Asimmetria radiante dovuto alla presenza di soffitto freddo**

$$PD = \frac{100}{1 + e^{(9{,}93\ -0{,}50\ \times\ \Delta t_{pr})}} \tag{2.14}$$

- **Asimmetria radiante dovuto alla presenza di una parete calda**

$$PD = \frac{100}{1 + e^{(3{,}72\ -0{,}052\ \times\ \Delta t_{pr})}} - 3{,}5 \tag{2.15}$$

- **Asimmetria radiante dovuto alla presenza di una parete freddo**

$$PD = \frac{100}{1 + e^{(6{,}61\ -0{,}345\ \times\ \Delta t_{pr})}} \tag{2.16}$$

Per gli intervalli di validità delle relazioni da adottare ai fini della valutazione del discomfort locale si rimanda a quanto riportato alla norma UNI EN ISO 7730 [18].

2.2.3 La valutazione degli ambienti moderabili non moderati: l'indice di calore (Heat Index)

Gli ambienti termici moderabili non moderati sono degli ambienti moderabili in cui, a causa di errori tipicamente di carattere tecnico e/o organizzativo, gli estremi degli intervalli di applicabilità del metodo PMV vengono superati [12]. In tale tipologia di ambienti, in relazione alle caratteristiche soggettive e alla tipologia di attività svolta, possono essere presenti delle condizioni tali da favorire l'insorgere di situazioni di "stress termico" con un conseguente aumento della sudorazione, della frequenza cardiaca e della temperatura interna [12;21]. Pertanto, al fine di valutare il livello di disagio fisiologico provato dalle persone ed il livello di rischio relativo all'insorgenza di patologie legate allo "stress da calore" è possibile fare riferimento all'indice di calore Heat Index [21].

L'indice di calore è stato definito per la prima volta a partire dagli studi fisiologici sperimentali condotti nel 1797 da *Robert G. Steadman* [28;29] nei quali una serie di parametri ambientali, tra cui l'umidità dell'aria, la temperatura a bulbo secco, la velocità del vento e la radiazione solare, vennero correlati in un unico indice in grado determinare la "*temperatura apparente*[11]" percepita [30]. Successivamente i risultati ottenuti da tali vennero analizzati matematicamente da numero studiosi portando alla formulazione di altrettanti algoritmi in grado di correlare i risultati ottenuti da Steadman con i parametri ambientali di temperatura e umidità dell'aria [27;30]: gli indici definiti da tali relazioni matematiche prendono il nome di Heat Index.

[11] *Temperatura apparente*: rappresenta la temperatura percepita dalle persone in quelle specifiche condizioni ambientali e soggettivi, e dunque come la combinazione di temperatura dell'aria, umidità, velocità dell'aria, abbigliamento, intensità dell'attività metabolica, etc. [28;29]

Tra gli indici di calore proposti, quello in grado di correlare al meglio i risultati ottenuti da Steadman ed utilizzando in numerosi calcolatori online (tra cui quello del *National Oceanic and Atmospheric Administration* [31] e del *Portale Agenti Fisici* [32]) è quello proposto dal ricercatore *Lans P. Rothfusz* [31;33], ovvero

$$HI = -42.379 + 2.0490152 \times T + 10.14333127 \times RH - 0.22475541 \times T \times RH - 0.00683783 \times T^2 - 0.05481717 \times RH^2 + 0.00122874 \times T^2 \times RH + 0.00085282 \times T \times RH^2 - 0.00000199 \times T^2 \times RH^2 \quad (2.17)$$

dove:

- HI rappresenta l'Heat Index [°F]
- T rappresenta la temperatura dell'aria (temperatura a bulbo secco) [°F]
- RH rappresenta l'umidità relativa [%]

Per garantire una maggior facilità di utilizzo e di lettura, i valori dell'Heat Index proposto da *Lans P. Rothfusz* vengono raggruppati in delle matrici in funzione della temperatura dell'aria e dell'umidità relativa come quella riportata nella *Figura 2.2.2* [34]. Tale matrice identifica 4 livelli di rischio, dalla "cautela per possibile affaticamento" fino al "rischio elevato di colpo di calore" [21], per i quali è possibile determinare possibili effetti sulla salute umana come ad esempio i crampi muscolari, la disidratazione o il colpo di calore.

Temperature / Relative humidity	80 °F (27 °C)	82 °F (28 °C)	84 °F (29 °C)	86 °F (30 °C)	88 °F (31 °C)	90 °F (32 °C)	92 °F (33 °C)	94 °F (34 °C)	96 °F (36 °C)	98 °F (37 °C)	100 °F (38 °C)	102 °F (39 °C)	104 °F (40 °C)	106 °F (41 °C)	108 °F (42 °C)	110 °F (43 °C)
40%	80 °F (27 °C)	81 °F (27 °C)	83 °F (28 °C)	85 °F (29 °C)	88 °F (31 °C)	91 °F (33 °C)	94 °F (34 °C)	97 °F (36 °C)	101 °F (38 °C)	105 °F (41 °C)	109 °F (43 °C)	114 °F (46 °C)	119 °F (48 °C)	124 °F (51 °C)	130 °F (54 °C)	136 °F (58 °C)
45%	80 °F (27 °C)	82 °F (28 °C)	84 °F (29 °C)	87 °F (31 °C)	89 °F (32 °C)	93 °F (34 °C)	96 °F (36 °C)	100 °F (38 °C)	104 °F (40 °C)	109 °F (43 °C)	114 °F (46 °C)	119 °F (48 °C)	124 °F (51 °C)	130 °F (54 °C)	137 °F (58 °C)	
50%	81 °F (27 °C)	83 °F (28 °C)	85 °F (29 °C)	88 °F (31 °C)	91 °F (33 °C)	95 °F (35 °C)	99 °F (37 °C)	103 °F (39 °C)	108 °F (42 °C)	113 °F (45 °C)	118 °F (48 °C)	124 °F (51 °C)	131 °F (55 °C)	137 °F (58 °C)		
55%	81 °F (27 °C)	84 °F (29 °C)	86 °F (30 °C)	89 °F (32 °C)	93 °F (34 °C)	97 °F (36 °C)	101 °F (38 °C)	106 °F (41 °C)	112 °F (44 °C)	117 °F (47 °C)	124 °F (51 °C)	130 °F (54 °C)	137 °F (58 °C)			
60%	82 °F (28 °C)	84 °F (29 °C)	88 °F (31 °C)	91 °F (33 °C)	95 °F (35 °C)	100 °F (38 °C)	105 °F (41 °C)	110 °F (43 °C)	116 °F (47 °C)	123 °F (51 °C)	129 °F (54 °C)	137 °F (58 °C)				
65%	82 °F (28 °C)	85 °F (29 °C)	89 °F (32 °C)	93 °F (34 °C)	98 °F (37 °C)	103 °F (39 °C)	108 °F (42 °C)	114 °F (46 °C)	121 °F (49 °C)	128 °F (53 °C)	136 °F (58 °C)					
70%	83 °F (28 °C)	86 °F (30 °C)	90 °F (32 °C)	95 °F (35 °C)	100 °F (38 °C)	105 °F (41 °C)	112 °F (44 °C)	119 °F (48 °C)	126 °F (52 °C)	134 °F (57 °C)						
75%	84 °F (29 °C)	88 °F (31 °C)	92 °F (33 °C)	97 °F (36 °C)	103 °F (39 °C)	109 °F (43 °C)	116 °F (47 °C)	124 °F (51 °C)	132 °F (56 °C)							
80%	84 °F (29 °C)	89 °F (32 °C)	94 °F (34 °C)	100 °F (38 °C)	106 °F (41 °C)	113 °F (45 °C)	121 °F (49 °C)	129 °F (54 °C)								
85%	85 °F (29 °C)	90 °F (32 °C)	96 °F (36 °C)	102 °F (39 °C)	110 °F (43 °C)	117 °F (47 °C)	126 °F (52 °C)	135 °F (57 °C)								
90%	86 °F (30 °C)	91 °F (33 °C)	98 °F (37 °C)	105 °F (41 °C)	113 °F (45 °C)	122 °F (50 °C)	131 °F (55 °C)									
95%	86 °F (30 °C)	93 °F (34 °C)	100 °F (38 °C)	108 °F (42 °C)	117 °F (47 °C)	127 °F (53 °C)										
100%	87 °F (31 °C)	95 °F (35 °C)	103 °F (39 °C)	112 °F (44 °C)	121 °F (49 °C)	132 °F (56 °C)										

Key to colors: Caution — Extreme caution — Danger — Extreme danger

Figura 2.2.2 Matrice Heat Index [34]

Valore di Heat Index [°F]	Disturbi
< 80	Nessun rischio di colpo di calore *(tranne ipersensibili e coloro che indossano indossa DPI che modificano isolamento complessivo)*
da 80 a 90	Possibile affaticamento *(tranne ipersensibili e coloro che indossano indossa DPI che modificano isolamento complessivo)*
da 90 a 104	Affaticamento, possibili crampi muscolari
da 105 a 129	Affaticamento, crampi muscolari, possibile colpo di calore
> 130	Rischio elevato di colpo di calore

Tabella 2.2.4: Disturbi in ambienti moderabili non moderati [32;34]

Tuttavia, sebbene l'Heat Index sia un indice estremamente semplice da utilizzare, presenta numerosi limiti primo fra tutti il suo campo di applicabilità limitato poiché non può essere adottato qualora la temperatura dell'aria risulti inferiore a 27 °C o qualora l'umidità relativa sia inferiore al 40% [32;34]. Inoltre, tale indice può essere adottato soltanto qualora l'esposizione delle persone avvenga in un ambiente outdoor ombreggiato, in presenza di una leggera ventilazione ed in assenza di DPI o indumenti pesanti [32] che possano limitare la traspirazione. In tali condizioni l'Heat Index sarà necessario adottare misure di tutela aggiuntive qualora le lavorazioni richiedano l'utilizzo di DPI [32] oppure aumentare l'indice di calore fino a 15 °C in caso di esposizione diretta alla radiazione solare [30;32] al fine di non sottostimare il reale livello di rischio.

Pertanto, al netto dei limiti di applicabilità del metodo di valutazione dell'Heat Index, qualora sia necessario verificare se in un ambiente caldo, sia esso moderabile non moderato o severo, sono presenti delle condizioni microclimatiche tali da costituire un rischio per la salute degli individui, sarà opportuno procedere alla valutazione analitica degli indici del metodo WBGT e del metodo PHS, secondo le metodologie di analisi riportate rispettivamente nelle norme UNI EN ISO 7243 [35] e UNI EN ISO 7933 [36].

2.3 La valutazione degli ambienti severi caldi

Analogamente a quanto accade nella valutazione degli ambienti moderabili, il d.lgs 81/08 [16] non definisce alcuna metodologia di valutazione per gli ambienti vincolati severi caldi, ovvero quegli ambienti in cui a causa di vincoli legati alle necessità produttive o alle condizioni ambientali [7] sono presenti parametri termo-igrometrici tali da sollecitare eccessivamente il sistema di termoregolazione dell'individuo a causa dell'aumento della temperatura corporea [5;12;21]. Pertanto, se negli ambienti moderabili l'obiettivo da porsi è quello di garantire la condizione benessere termico, negli ambienti severi caldi sarà necessario tutelare la salute e la sicurezza dell'individuo [12;35] poiché a causa di intese e prolungate sollecitazioni termiche a cui l'organismo umano è sottoposto, possono manifestarsi condizioni di stress termico e patologie da alte temperature, come la sincope da calore o il colpo di calore [7].

Al fine di valutare il livello di disagio fisiologico provato dalle persone e stabilire se in tale tipologia di ambienti sono presenti condizioni di rischio causate dallo stress da calore, è necessario definire degli indici in grado di correlare quantitativamente i parametri ambientali e soggettivi alla condizione di stress termico provata dall'individuo. Le norme tecniche di riferimento che consentono di eseguire la valutazione dello stress termico sono la UNI EN ISO 7243 [35] e la UNI EN IS 7993 [36] e nello specifico:

- La norma UNI EN ISO 7243 [35], la quale definisce una metodologia di analisi in grado di eseguire una valutazione preliminare ed esplorativa dell'ambiente in esame tramite la quantificazione dell'indice *Wet Bulb Globe Temperature* (WBGT) [21;35];
- La norma UNI EN ISO 7933 [36], la quale consente di eseguire per poter eseguire una valutazione più approfondita dell'ambiente in esame tramite la definizione del modello *Predicted Heat Strain* (PHS) [21;35;36].

Tuttavia, sebbene l'utilizzo del metodo WBGT e del modello PHS definiti da tali normative consenta di valutare quantitativamente lo stress termico cui la persona è sottoposta nell'ambiente severo caldo, questi non consentono di definire la condizione di rischio a cui un soggetto ipersensibile viene sottoposto [21]. Pertanto, secondo quanto riportato al *Titolo VIII Capo I, Articolo 183* e al *Titolo VIII Capo I, Articolo 185, comma 2* del d.lgs 81/08 [16], i lavoratori particolarmente sensibili allo stress termico necessiteranno, nell'ambito della sorveglianza sanitaria, di una valutazione specifica in relazione alle condizioni individuali ed alla tipologia di attività svolta [21].

2.3.1 La Norma UNI EN ISO 7243 – L'indice Wet Bulbe Globe Temperature (WBGT)

Per poter valutare in maniera preliminare [21] se nell'ambiente severo caldo sono effettivamente presenti delle condizioni di rischio per la salute dei lavoratori, la norma tecnica di riferimento è la UNI EN ISO 7243 [35], la quale prevede di valutare lo stress termico a cui una persona è sottoposta tramite l'analisi dell'indice WBGT ed il suo confronto con i valori limite di riferimento. Tale normativa consente infatti di valutare lo stress termico a cui l'individuo è sottoposto tenendo conto:

a) Delle caratteristiche dell'ambiente termico, ovvero dalla temperatura dell'aria t_a, dalla temperatura neutra del bulbo umido t_{nw} e dalla temperatura radiante del globo nero t_g). Tali parametri consento di quantificare l'indice WBGT;
b) Dell'abbigliamento indossato, dal quale viene determinato il fattore correttivo dell'abbigliamento CAV tramite l'ausilio dell'*Allegato F* [35];
c) Della produzione di calore del corpo e dunque dall'intensità dell'attività metabolica M, dalla quale si ottengono i valori limite di riferimento del WBGT

Secondo la norma UNI EN ISO 7243 [35], la procedura di valutazione dell'ambiente severo caldo prevede innanzitutto di determinare l'indice WBGT il quale, a seconda che l'ambiente severo caldo sia all'interno o all'esterno di un edificio, viene definito dalle seguenti relazioni

- **Negli gli ambienti indoor**, essendo in assenza di radiazione solare, il WBGT si ricava utilizzando la seguente relazione

$$WBGT = 0{,}7t_{nw} + 0{,}3t_g \tag{2.18}$$

- **Negli gli ambienti outdoor** o nel caso in cui una persona sia all'interno di un edifico e contemporaneamente esposta alla radiazione solare (come avviene nel caso di postazioni operative vicino alle finestre), per poter tener conto della sovrastima del calore radiante diretto del sole [35] il contributo della temperatura del globo nero viene ridotto tenendo conto della temperata dell'aria. Di conseguenza, in tipologia di ambienti l'indice WBGT si ottiene facendo riferimento alla seguente relazione

$$WBGT = 0{,}7t_{nw} + 0{,}2t_g + 0{,}1t_a \tag{2.19}$$

dove:

- t_{nw} rappresenta la temperatura neutra del bulbo umido [°C];
- t_g rappresenta la temperatura radiante del globo nero [°C];
- t_a rappresenta la temperatura dell'aria [°C].

Dalle precedenti relazioni, gli indici WBGT che si ottengono fanno riferimento ad una persona che indossa un abbigliamento da lavoro standard avente un isolamento termico pari a 0,6 clo [37] e che comprende un pantalone leggero e una maglietta a maniche corte in cotone [35;37]. Tuttavia poiché le caratteristiche termiche e la tipologia di vestiario indossato possono facilmente discostarsi da quelle standard e data la loro importanza negli scambi termici che avvengono tra la persona e l'ambiente circostante, la normativa introduce un fattore correttivo del WBGT che tenga conto della tipologia di vestiario, ovvero CAV [35]. Tale valore può essere ottenuto dai valori proposti all'*Allegato F* [35] e consente di determinare l'indice WBGT che rappresenta la condizione di stress termico a cui la persona è sottoposta in tale ambiente in funzione del vestiario indossato, ossia il $WBGT_{eff}$, il quale è viene definito dalla seguente relazione:

$$WBGT_{eff} = WBGT + CAV \tag{2.20}$$

Determinato il $WBGT_{eff}$, per poter verificare se nell'ambiente severo caldo sono presenti condizioni tali da costituire un rischio per la salute dell'individuo, è necessario confrontare tale valore con il valore limite di riferimento del WBGT, ossia il $WBGT_{ref}$. In particolare, essendo le persone non acclimatate maggiormente a rischi associati alle alte temperature ed essendo il loro sistema di termoregolazione meno efficiente rispetto a quello delle persone acclimatate [7], la normativa definisce due valori limiti del WBGT in funzione dello stato di acclimatamento. Tali valori limite possono essere determinati in funzione della classe dell'attività metabolica svolta facendo riferimento alla tabella presente nell'*Allegato A* [35].

Classe di Metabolismo Energetico	**Metabolismo Energetico [W]**	**Valore Limite di Riferimento del WBGT per un soggetto acclimatato [° C]**	**Valore Limite di Riferimento del WBGT per un soggetto non acclimatato [° C]**
Classe 0 *Metabolismo Energetico a Riposo*	115	33	32
Classe 1 *Metabolismo Energetico Basso*	180	30	29
Classe 2 *Metabolismo Energetico Medio*	300	28	26
Classe 3 *Metabolismo Energetico Alto*	415	26	23
Classe 4 *Metabolismo Energetico Molto Alto*	520	25	20

Tabella 2.3.1: Valori $WBGT_{ref}$ di riferimento per persone acclimatate e non acclimatate [35]

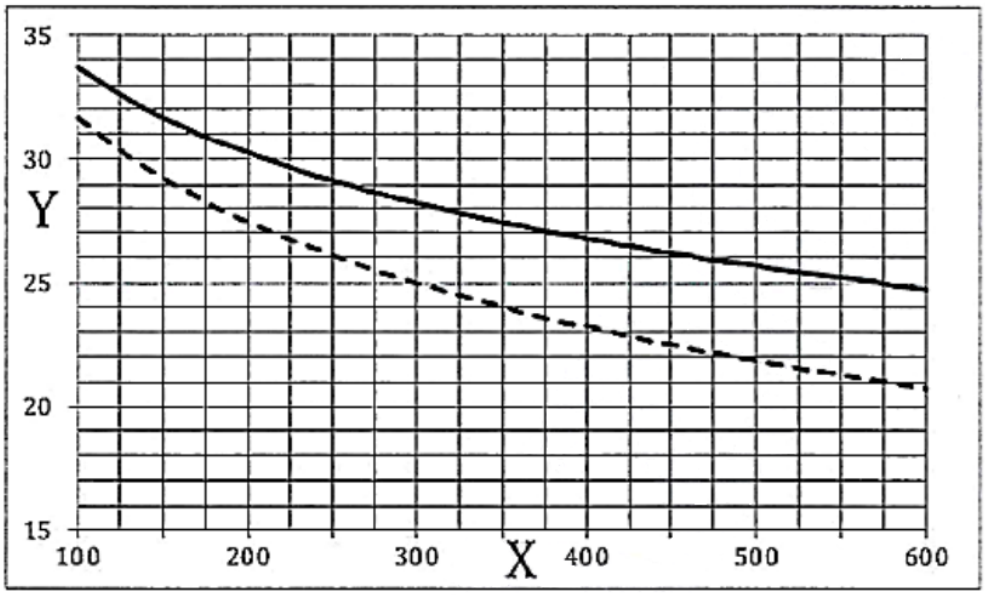
In alternativa, qualora sia possibile stimare l'intensità dell'attività metabolica in maniera più accurata, ad esempio utilizzando uno dei quattro metodi proposti dalla norma UNI EN ISO 8996 [20], il $WBGT_{ref}$ può essere stimato a partire dalle seguenti relazioni [35]:

- Se il soggetto è acclimatato, il $WBGT_{ref}$ si ottiene dalla seguente relazione

$$WBGT_{ref} = 56{,}7 - 11{,}5 \times log_{10}(M) \tag{2.21}$$

- Se il soggetto non è acclimatato, il $WBGT_{ref}$ si ottiene dalla seguente relazione

$$WBGT_{ref} = 59{,}9 - 14{,}1 \times log_{10}(M) \tag{2.22}$$



Asse X *Metabolismo Energetico [W]*
Asse Y *$WBGT_{eff}$ [°C]*
——— *Valore limite del WBGT per una persona acclimatata*
- - - - - - *Valore limite del WBGT per una persona non acclimatata*

Figura 2.3.1: Andamento $WBGT_{ref}$ di una persona acclimatata e di una persona non acclimatata in funzione del metabolismo energetico [35]

Infine, per poter verificare se effettivamente nell'ambiente termico siano presenti delle condizioni tali da sottoporre le persone ad una condizione di stress termico da calore [35], sarà necessario confrontare il valore effettivo con il valore limite del WBGT e, a seconda dei risultati ottenuti, si potrà avere che:

- Se $\mathbf{WBGT_{eff} \leq WBGT_{ref}}$, la persona non è sottoposta ad alcuna condizione di stress termico e pertanto non è necessario intraprendere azioni correttive [35];
- Se $\mathbf{WBGT_{eff} > WBGT_{ref}}$, in questo caso sarà necessario
  a) Ridurre lo stress termico a cui l'individuo è sottoposto con metodi appropriati, ad esempio riducendo l'intensità dell'attività svolta [21], oppure
  b) Eseguire una valutazione dell'ambiente severo caldo utilizzando il metodo del PHS proposto dalla norma UNI EN ISO 7933 [36].

2.3.2 La norma UNI EN ISO 7933 – Il metodo del Predicted Heat Strain (PHS)

Sebbene il metodo d'analisi del WBGT possa essere adottato per valutare in via e preliminare se in un ambiente severo caldo sono presenti delle condizioni tali da portare nel soggetto ad una condizione di stress termico [21;35], qualora il $WBGT_{ref}$ dovesse essere superato la norma UNI EN ISO 7243 [35] prevede di eseguire una valutazione più accurata mediante la metodologia d'analisi introdotta dalla norma UNI EN ISO 7933 [36]. Infatti, a differenza del metodo del WBGT, tale normativa consente di valutare lo stress termico a cui l'individuo è sottoposto nell'ambiente severo caldo facendo riferimento ad una metodologia d'analisi basata sull'equazione di bilancio energetico in grado di valutare istante per istante gli scambi termici che avvengono

tra la persona e l'ambiente circostante, ovvero il modello dello stress termico previsto (*Predicted Heat Strain, PHS*) [36]. In particolare, riconoscendo il ruolo primario svolta in tale tipologia di ambiente dalla sudorazione e trascurando gli scambi termici per conduzione, K essendo il loro contributo marginale [36], l'equazione di bilancio energetico può essere riformulata come segue

$$E_{req} = M - W - C_{res} - E_{res} - C + R - dS_{eq} \tag{2.23}$$

dove E_{req} rappresenta la potenza termica che è necessario dissipare attraverso la sudorazione per mantenere la condizione di equilibrio termico mentre dS_{eq} rappresenta la potenza termica associata all'incremento della temperatura del nucleo corporeo t_{cr}.

Basandosi sull'equazione di bilancio energetico, per poter applicare il metodo del PHS è necessario conoscere gli stessi parametri ambientali e soggettivi utilizzati per la valutazione del PMV, vale a dire:

- Parametri Ambientali: ovvero la temperatura dell'aria t_a, la temperatura media radiante t_r, la velocità dell'aria v_{ar} e l'umidità dell'aria (espressa come pressione parziale di vapor d'acqua p_a) [18;36], necessari alla caratterizzazione dell'ambiente termico in esame [21;36];
- Parametri Soggettivi: ovvero il metabolismo energetico M e l'isolamento termico dell'abbigliamento I_{cl}, che identificano rispettivamente l'intensità dell'attività compiuta dall'individuo ed il loro abbigliamento [21;36].

Analogamente al metodo del PMV, la metodologia d'analisi del PHS risulta valida soltanto qualora i parametri ambientali e soggettivi siano compresi entro i limiti riportati nella *Tabella 2.3.2*. Tuttavia nell'eventualità che il superamento dei limiti di applicabilità non sia eccessivamente elevato, il metodo d'analisi proposto dalla norma UNI EN ISO 7933 [36] potrà comunque essere adottato e fornire indicazioni corrette [12;36], ma in tal caso sarà necessario prestare particolare attenzione alle persone esposte [36] mediante supervisione medica diretta [12]. Inoltre, poiché gli isolamenti termici degli indumenti protettivi contro il caldo proposti dalla norma UNI EN ISO 9920 [25] sono superiori al valore limite, il metodo del PHS può ritenersi valido anche qualora l'abbigliamento indossato abbia caratteristiche compatibili con quelle dei capi d'abbigliamento proposti dalla suddetta normativa [12].

Parametri		**Intervallo di validità**
Ambientali	Temperatura dell'aria (ta)	+ 15 °C ÷ 50 °C
	Differenza tra temperatura radiante e temperatura dell'aria (tr - ta)	+ 0 °C ÷ 60 °C
	Velocità relativa dell'aria (var)	0 m/s ÷ 3 m/s
	Pressione parziale del vapor d'acqua (pa)	0,5 Pa ÷ 4,5 kPa
Soggettivi	Metabolismo energetico (M)	56 W/m² ÷ 250 W/m²
	Isolamento termico dell'abbigliamento (Icl)	0,1 clo ÷ 1 clo

Tabella 2.3.2: Limiti di validità del modello PHS [36]

Per poter valutare l'entità dello stress termico provato dalle persone esposte in un determinato ambiente severo caldo, il metodo d'analisi del PHS fa riferimento ai descrittori di sforzo termico (*strain* termico), vale a dire:

- La massima temperatura rettale ammissibile $t_{re,max}$, fissato dalla normativa a 38 °C, la quale rappresenta la temperatura oltre la quale il sistema di termoregolazione dell'individuo viene sottoposto ad una condizione di stress termico [36];
- La massima perdita totale d'acqua D_{max}, ovvero la massima perdita di liquidi compatibile con il corretto mantenimento dei processi fisiologici [21]. Il valore limite D_{max} viene determinato in funzione della massa corporea dell'individuo e a seconda che questo abbia la possibilità o meno di reintegrare i liquidi persi durante la sudorazione.

Quantità	Soggetto libero di bere	Soggetto non libero di bere
D_{max50} [g]	7% della massa corporea	3% della massa corporea
D_{max95} [g]	5% della massa corporea	3% della massa corporea

Tabella 2.3.3. Tabella delle massime perdite di acqua ammissibili D_{max}. Il D_{max50} e il D_{max95} fanno riferimento ai valori limite da adottare per proteggere rispettivamente il 50% ed il 95% della popolazione di lavoratori [36].

Al fine di verificare che i valori $t_{re,max}$ e D_{max}, non siano superati, il metodo del PHS prevede di seguire l'evoluzione temporale degli scambi termici che avvengono tra la persona e l'ambiente circostante mediante un *processo iterativo*[12] [36], attraverso il quale è possibile monitorare minuto per minuto i parametri fisiologici di interesse, ossia la perdita totale di liquidi S_{Wtot} e la temperatura rettale $t_{re,i}$ e confrontarli con i valori limite di riferimento. I principali passaggi sono:

1) Calcolare il flusso di calore evaporativo sulla superficie della pelle richiesto E_{req}, la produzione oraria di sudore richiesta per dissipare il calore in eccesso attraverso la sudorazione S_{Wreq} e la frazione di pelle bagnata richiesta per dissipare il calore attraverso l'evaporazione del sudore w_{req}. In particolare è possibile ottenere il tasso di sudorazione richiesto all'istante i-esimo utilizzando la seguente relazione

$$S_{Wreq,i} = \frac{E_{req,i}}{r_{eq,i}} \tag{2.24}$$

   dove r_{eq} rappresenta l'efficienza evaporativa la quale può essere determinata in funzione della percentuale di pelle bagnata utilizzando le formule riportate al *Punto A.11* [36].

2) Valutare la produzione di sudore prevista S_{Wp}, la percentuale di pelle bagnata prevista w_p ed il flusso evaporativo sulla superficie della pelle previsto E_p secondo la procedura descritta dal flow chart riportato al *Punto A.12* [36] considerando i criteri di stress termico E_{max}, w_{max} e S_{Wmax}, i quali vengono valutati in funzione dello stato di acclimatamento della persona. In particolare è possibile ottenere il tasso di sudorazione previsto i-esimo utilizzando la seguente relazione

[12] *Processo Interattivo:* la normativa UNI EN ISO 7933 [36] descrive il processo interattivo e le relative formule all' *Allegato A* mentre nell'*Allegato E* propone un esempio di codice di calcolo in grado di eseguire il processo interattivo necessario all'applicazione del modello PHS.

$$S_{Wp,i} = e^{\left(-\frac{1}{10}\right)} \times S_{Wp,i-1} + (1 - k_{Sw}) \times S_{Wreq,i} \tag{2.25}$$

Quantità	Soggetto acclimatato	Soggetto non acclimatato
S_{Wmax}	400 [g/h]	500 [g/h]
w_{max}	0,85 [-]	1 [-]

Tabella 2.3.4. Tabella della massima potenza termica dissipabile per sudorazione S_{Wmax} e della massima frazione di pelle dalla quale può essere fatto evaporare il sudore w_{max} per il soggetto acclimatato e non acclimatato [36].

3) Determinare il calore immagazzinato Q_{tot} come la somma tra la potenza termica associata all'incremento della temperatura del nucleo corporeo dS_{eq} e la differenza tra il flusso di calore evaporativo richiesto e previsto, secondo la relazione

$$Q_{tot,i} = E_{req,i} - E_{p,i} + Q_{eq,i} \tag{2.26}$$

Noto Q_{tot} sarà possibile valutare la temperatura del nucleo t_{cr} e successivamente la rettale t_{re}. In particolare la temperatura rettale all'istante i-esimo sarà ottenuta dalla seguente relazione:

$$t_{re,i} = t_{re,i-1} + \frac{2\,t_{cr,i} - 1{,}926\,t_{re,i-1} - 1{,}31}{9} \tag{2.27}$$

4) Infine, la perdita totale di liquidi S_{Wtot} sarà pari alla somma delle perdite di liquidi per effetto della sudorazione S_{Wp} e da quelle dovute al flusso di calore evaporativo durante la respirazione E_{res} [36]. Pertanto, dal momento che 1 W/m^2 corrisponde al flusso di sudore di 2,67 g/h e che per una persona standard la superficie corporea è pari a 1,8 m^2 [36], la perdita totale di liquidi S_{Wtot} all'istante i-esimo sarà pari a

$$S_{Wtot,i} = \left(S_{Wtot,i-1} + S_{Wp,i} + E_{res}\right) \times \frac{2{,}67}{1{,}8 \times 60} \times A_{du} \tag{2.28}$$

dove A_{du} rappresenta *l'area di superficie corporea calcolato secondo il modello di DuBois*[13]

Invece per poter valutare il tempo limite d'esposizione è necessario confrontare i due descrittori di sforzo termico $t_{re,i}$ e $S_{Wtot,i}$ con i valori limiti di accettabilità della temperatura rettale $t_{re,max}$ e della perdita di liquidi D_{max50} e D_{max95} ottenendo così i rispettivi tempi limite, vale a dire:

- Il D_{limtre}, ossia il tempo oltre il quale la temperatura rettale $t_{re,max}$ viene superata;
- Il $D_{limloss50}$ e il $D_{limloss95}$, ossia il tempo oltre il quale la perdita totale di liquidi supera i rispettivi valori limite. Dal momento il D_{max95} fa riferimento alla perdita totale di liquidi ammissibile per il 95 % della popolazione [36] si preferisce fare riferimento al $D_{limloss95}$ essendo questo più cautelativo rispetto al $D_{limloss50}$ [21].

[13] *Area superficie corporea:* l'area della superficie corporea viene calcolato secondo il modello di DuBois in funzione dell'altezza e della massa corporea secondo la relazione $A_{du}[m^2] = 0.007184 \times (Altezza\ [cm])^{0.725} \times (Peso\ \ [kg])^{0.425}$

Dopo aver determinato il D_{limtre} ed il $D_{limloss95}$, il tempo limite d'esposizione all'ambiente severo caldo D_{lim} corrisponderà all'istante i-esimo in cui la temperatura rettale o la perdita di liquidi raggiungono i relativi valori limite e dunque sarà pari a:

$$D_{lim} = \min(D_{limtre}; D_{limloss95}) \tag{2.29}$$

Qualora il D_{lim} non superi l'effettivo tempo d'esposizione all'ambiente severo caldo, non sarà necessario adottare alcuna azione correttiva, mentre in caso contrario l'esposizione sarà dà considerarsi inaccettabile e pertanto sarà necessario intraprendere delle azioni migliorative di carattere tecnico e/o organizzativo. Tuttavia, la norma UNI EN ISO 7933 [36] raccomanda di prestare particolare attenzione nei casi in cui il tempo limite d'esposizione risulti inferiore ai 30 minuti e/o nel caso in cui il vapore d'acqua condensi sulla pelle, ovvero qualora il flusso di calore evaporativo E_{max} risulti essere negativo [36] poiché in tali circostante il meccanismo della sudorazione non sarebbe in grado di intervenire nei tempi e nelle modalità previste dal modello PHS [12].

2.3.3 Il confronto tra le norme UNI EN ISO 7243 e UNI EN ISO 7933

In ambiente severo caldo, secondo il vigente apparato normativo, la valutazione dello stress termico a cui una persona è sottoposta in un ambiente severo caldo può essere eseguita utilizzando sia il metodo del WBGT descritto nella norma UNI EN ISO 7243 [35], sia il metodo PHS descritto invece nella norma UNI EN ISO 7933 [36]. Tuttavia, sebbene il metodo proposto dalla UNI EN ISO 7243 [35] sia indubbiamente il più semplice tra le due metodologie d'analisi e nonostante i numerosi decenni di applicazione [12], esso rimane in ogni caso un metodo semplificato e preliminare [12;21;35;37] ed è pertanto preferibile utilizzare, qualora possibile, il metodo del PHS [12]. Infatti, il metodo del WBGT è stato sviluppato al fine di valutare lo stress da calore a cui una persona è sottoposta nel corso di un'intera giornata lavorativa [35] permettendo soltanto di verificare se in un ambiente termico siano presenti condizioni tali da favorire situazioni di stress termico [12;35]. Invece il metodo del PHS consente di ottenere una quantificazione del rischio termico molto più accurata essendo questo basato sull'equazione di bilancio energetico [12] ed essendo in grado non soltanto di valutare l'entità dello stress termico, ma anche il tempo limite d'esposizione all'ambiente severo caldo [36]. Inoltre, dal momento che a differenza del metodo del WBGT la metodologia d'analisi proposta dalla norma UNI EN ISO 7933 [36] consente di seguire l'evoluzione temporale degli scambi termici che avvengono tra la persona e l'ambiente circostante [36], il metodo del PHS può essere adottato anche qualora le situazioni ambientali siano variabili nel tempo [12;36] e tenere conto di eventuali valori di picco dello stress termico [35] come nel caso di attività di breve durata che richiedono un elevato sforzo fisico.

Inoltre, il metodo proposto dalla UNI EN ISO 7933 [36] risulta essere più flessibile rispetto al metodo del WBGT [35] dal momento che può essere applicato in diverse situazioni, soprattutto per quanto riguarda la tipologia e le caratteristiche del vestiario utilizzato [12;36]. Il metodo del PHS [36] permette infatti di valutare lo stress termico a cui la persona è sottoposta tenendo conto non soltanto dell'isolamento termico I_{cl}, ma anche del coefficiente di riflessione F_r e della frazione del corpo coperta dall'abbigliamento A_p [36]. Invece, nonostante l'abbigliamento indossato sia uno dei principali fattori in grado di influenzare gli scambi termici

che avvengono tra la persona e l'ambiente circostante, il metodo proposto dalla norma UNI EN ISO 7243 [35] ne tiene conto soltanto in partire tramite il fattore correttivo CAV [35]. Infatti, come affermato nello studio condotta da *Ken Parson* [37], per poter valutare correttamente l'effetto del vestiario tramite il metodo del WBGT [35] basterebbe posizionare dei campioni sagomati dei capi indossati sopra (o parzialmente sopra, a seconda della porzione di pelle esposta) il globotermometro ed il termometro a bulbo umido [37]. In questo modo sarebbe possibile simulare l'effetto della sudorazione e dell'assorbimento della radiazione termica ed ottenere quindi una migliore stima dell'indice WBGT; tuttavia, ciò comporta anche un aumento non solo dei costi, ma anche della complessità nella procedura di misurazione [37].

Infine, un ulteriore vantaggio nell'utilizzo del metodo del PHS [36] risiede nel fatto che i parametri ambientali e soggettivi necessari alla valutazione dello stress termico siano gli stessi richiesti per eseguire la valutazione degli ambienti termici moderabili; pertanto tale metodo di analisi non richiede l'uso di strumentazione aggiuntiva [12;18;36], come avviene invece per la procedura di valutazione dell'indice WBGT che richiede l'utilizzo di un termometro a bulbo umido [12;35].

Pertanto, al netto delle precedenti considerazioni, qualora sia necessario eseguire una valutazione più accurata dello stress termico a cui una persona è sottoposta o nel caso in cui il valore limite dell'indice WBGT venga superato [12:35] sarà preferibile adottare il metodo di valutazione introdotto dalla norma UNI EN ISO 7933 [12;36] nonostante la maggior complessità del metodo di valutazione.

2.4 La valutazione degli ambienti severi freddi – La norma UNI EN ISO 11079

Analogamente a quanto accade per la valutazione degli ambienti moderabili e gli ambienti severi caldi, il d.lgs 81/08 [16] non definisce alcuna metodologia di valutazione per gli ambienti vincolati severi freddi, ovvero quegli ambienti in cui a causa di vincoli legati alle necessità produttive o alle condizioni ambientali [7] sono presenti temperature e percentuali di umidità tali causare il raffreddamento corpo o di alcune sue parti [12;21]. La norma tecnica che consente di valutare lo stress termico a cui un individuo è sottoposto in tale tipologia di ambienti è la UNI EN ISO 11079 [38] la quale definisce le metodologie di analisi che ne permettono la valutazione sia in termini di raffreddamento globale che in termine di raffreddamento localizzato. Tale normativa può essere applicata per qualsiasi tipologia di ambiente (sia indoor che outdoor) ed indipendentemente dalla modalità d'esposizione (continua, intermittente o occasionale) [38].

Secondo la UNI EN ISO 11079 [38], per poter mantenere l'equilibrio termico in un ambiente severo freddo le persone possono essere sottoposte a due condizioni fisiologiche di stress termico, ovvero:

- **A basso sforzo fisiologico**, al quale corrisponde la condizione di "neutralità termica" e nel quale i livelli di temperatura media interna rimangono nella norma [21;38] attraverso una bassa sollecitazione del sistema di termoregolazione [38];
- **Ad alto sforzo fisiologico**, il quale viene raggiunto qualora il sistema di termoregolazione dell'individuo non sia più in grado di mantenere l'equilibrio termico tramite un basso livello di sforzo fisiologico, ma soltanto tramite l'attivazione del meccanismo della vasocostrizione [38]. A tale condizione fisiologica la persona percepirà una sensazione di "freddo".

2.4.1 La valutazione del discomfort globale: il metodo del Insulation Required (IREQ)

In un ambiente severo freddo, per poter valutare lo stress termico globale a cui una persona è sottoposta, la norma UNI EN ISO 11079 [38] definisce il metodo del *Required Clothing Insulation* (IREQ), il cui indice IREQ rappresenta l'isolamento termico richiesto al fine di garantire nelle condizioni in esame l'equilibrio termico e mantenere la temperatura della pelle e del corpo entro valori accettabili [21;38].

Il metodo d'analisi proposta dalla UNI EN ISO 11079 [38] si basa sull'equazione di bilancio energetico e prevede di valutare lo stress termico a cui la persona è sottoposta confrontando l'indice IREQ con l'isolamento termico effettivo dall'abbigliamento $I_{cl,r}$. e determinare il tempo massimo d'esposizione all'ambiente severo freddo D_{lim} [38]. Pertanto, poiché che l'indice IREQ rappresenta una misura dello stress termico a cui l'individuo è sottoposto nell'ambiente severo freddo tramite la combinazione degli effetti della produzione di energia interna e degli scambi termici che avvengano tra la persona e l'ambiente circostante [38], ai fini della valutazione sarà necessario conoscere gli stessi parametri utilizzati nei metodi PMV e PHS, ovvero:

- Parametri Ambientali: ovvero la temperatura dell'aria t_a, la temperatura media radiante t_r, la velocità dell'aria v_{ar} e l'umidità dell'aria (espressa come pressione parziale di vapor d'acqua p_a) [18;38], necessari alla caratterizzazione dell'ambiente termico in esame [21;38];

- Parametri Soggettivi: ovvero il metabolismo energetico M e l'isolamento termico dell'abbigliamento I_{cl}, i quali identificano rispettivamente l'intensità dell'attività compiuta dall'individuo ed il suo abbigliamento [21;38].

Analogamente a quanto accade per i metodi di valutazione degli ambienti moderati e severi caldi, il metodo IREQ può essere adottato soltanto qualora i parametri ambientali (t_a, t_r, p_a e v_{ar}) e soggettivi (M, I_{cl}) rientrino nei limiti riportati alla *Tabella 2.4.1*

Parametri		**Intervallo di validità**
Ambientali	Temperatura dell'aria (ta)	≤ +15 °C
	Temperatura media radiante (tr)	-
	Velocità relativa dell'aria (var)	0,4 m/s ÷ 18 m/s
	Pressione parziale del vapor d'acqua (pa)	-
Soggettivi	Metabolismo energetico (M)	-
	Isolamento termico dell'abbigliamento (Icl)	≥ 0,5 clo

Tabella 2.4.1: Limiti di validità del modello IREQ [38]

L'indice IREQ rappresenta l'isolamento termico richiesto dall'abbigliamento per mantenere l'equilibrio termico e pertanto per poter valutare la condizione di stress termico a cui l'individuo è sottoposto in un ambiente severo freddo sarà necessario imporre nell'equazione del bilancio energetico la condizione di equilibrio termico, ossia porre S = 0 [38]. In particolare, poiché lo scambio termico per conduzione K risulta molto inferiore rispetto agli altri termini che compaiono nell'equazione [38] esso può essere considerato trascurabile e di conseguenza la relazione che si ottiene è la seguente:

$$M - W = E_{res} + C_{res} + E + R + C \tag{2.30}$$

dove i termini a sinistra rappresentano la produzione di calore interna del corpo mentre i termini a destra la somma degli scambi termici che avvengono tra il corpo e l'ambiente circostante. Tale equazione presenta tuttavia come incognite l'isolamento termico del vestiario I_{cl} e la temperatura dell'abbigliamento t_{cl}, e dunque per poter essere risolta sarà necessario utilizzare la relazione che lega lo scambio di calore secco (ossi R+C) al rapporto tra il gradiente di temperatura pelle-indumento (ossia t_{sk} - t_{cl}) e l'isolamento termico del vestiario I_{cl} [38], ovvero:

$$\frac{(t_{sk} - t_{cl})}{I_{cl}} = R + C = M - W - E_{res} - C_{res} - E \tag{2.31}$$

Infatti, imponendo l'isolamento termico dell'abbigliamento I_{cl} pari all'isolamento termico richiesto IREQ, quello che si ottiene è un sistema di due equazioni nelle incognite IREQ e t_{cl} [39], ossia:

$$\begin{cases} (M - W) = E_{res} + C_{res} + E + R + C \\ IREQ = \dfrac{(t_{sk} - t_{cl})}{R + C} \end{cases} \tag{2.32}$$

Sebbene questo sia un sistema di due equazioni e due incognite, per poter essere risolto richiede l'utilizzo di una *procedura interattiva*[14] poiché la temperatura dell'abbigliamento t_{cl} compare alla quarta potenza essendo il coefficiente di scambio termico per irraggiamento pari a $h_r = f(t_{cl}^4)$ [38;39]. Tuttavia, il problema presenta una serie di variabili indipendenti come la temperatura media della pella t_{sk} e la frazione di pelle bagnata w [38], ciononostante poiché l'equilibrio termico può essere raggiunto per diversi livelli di attivazione del sistema di termoregolazione [12;21;38;39], la norma UNI EN ISO 11079 [38] prevede di valutare lo stress termico globale mediante due indici distinti, vale a dire

- **$IREQ_{min}$**, ovvero il valore dell'isolamento termico minimo richiesto per mantenere il corpo in equilibrio termico a livelli subnormali di temperatura corporea media [38]. Tale indice corrisponde isolamento termico richiesto dall'abbigliamento qualora il sistema di termoregolazione sia sottoposta ad una elevata sollecitazione fisiologica [21;38], e si ottiene risolvendo il sistema (2.32) imponendo [39]

$$t_{sk} = 33{,}34 - 0{,}035\, M$$
$$w = 0{,}6$$

- **$IREQ_{neutro}$**, ovvero il valore dell'isolamento termico richiesto in grado di garantire la condizione di neutralità termica [38] Tale indice corrisponde isolamento termico richiesto dell'abbigliamento qualora il sistema di termoregolazione sia sottoposta ad una bassa sollecitazione fisiologica [c;z], e si ottiene risolvendo il precedente sistema imponendo [39]

$$t_{sk} = 35{,}7 - 0{,}0285\, M$$
$$w = 0{,}001\, M$$

Per poter quindi valutare se in un ambiente severo freddo sono presenti parametri ambientali e soggettivi tali da sottoporre la persona ad una condizione di stress termico, sarà necessario confrontare i valori degli indici IREQ ottenuti con l'isolamento termico dall'abbigliamento I_{cl} [38]. Tuttavia dal momento che questo rappresenta l'isolamento termico offerto dall'abbigliamento nelle condizioni di riferimento statiche [26], per tenere conto delle reali condizioni d'uso dell'abbigliamento, come la permeabilità dei tessuti e la velocità dell'aria e di movimento della persona [38;39], è necessario fare riferimento all'isolamento termico dell'abbigliamento corretto $I_{cl,r}$, il quale può essere ottenuto facendo riferimento alla seguene relazione

$$I_{cl,r} = I_{T,r} - \frac{I_{a,r}}{f_{cl}} \tag{2.33}$$

[14] <u>*Procedura interattiva:*</u> la procedura interattiva del calcolo dell'IREQ e t_{cl} prevede, dopo aver supposto il valore IREQ di prima interazione ($IREQ_0 = 0{,}5$) di ricavare dalla seconda equazione t_{cl} e successivamente verificare se il termine a sinistra della prima equazione coincide con la somma dei termini a destra. Qualora tale risultato sia verificato (al netto di uno scarto dello 0.01) il ciclo interattivo si interrompe e per tale valore di t_{lc} determina il valore IREQ corrispondente, altrimenti verrà determinato un nuovo valore di IREQ pari a $IREQ_i = IREQ_{i-1}$ + fattore incrementale ed il ciclo riprende. Per poter risolvere il processo interattivo è possibile utilizzare le formule riportate nell' *Allegato A* [38] o in alternativa calcolatori online come il software online *IREQ2009* [40]

dove $I_{T,r}$ e $I_{a,r}$ rappresentano rispettivamente l'isolamento termico totale risultante e l'isolamento termico risultante dello strato limite d'aria [26]. Confrontando a questo punto l'isolamento termico corretto $I_{cl,r}$ con i valori di isolamento termico richiesti $IREQ_{min}$ e $IREQ_{neutro}$, si possono verificare i seguenti casi:

- **Caso 1: $I_{cl,r} > IREQ_{neutro}$**

  In questo caso l'abbigliamento offre un isolamento termico superiore a quello necessario a garantire la condizione di equilibrio termico dell'individuo e pertanto avvertirà una sensazione termica di "caldo". In tali condizioni l'isolamento termico dell'abbigliamento dovrebbe essere ridotto poiché un isolamento termico eccessivo può portare ad un aumento della temperatura interna e di conseguenza aumentare ad il tasso di sudorazione e il rischio di ipotermia [38].

- **Caso 2: $IREQ_{min} \leq I_{cl,r} \leq IREQ_{neutro}$**

  In questo caso l'abbigliamento offre un isolamento termico adeguata a mantenere la condizione di equilibrio termico dell'individuo; pertanto, non sarà necessario intraprendere alcuna azione correttiva per quanto riguarda gli effetti del raffreddamento globale [21]. In tali condizioni valutare l'effetto del raffreddamento locale [38] in quanto la persona potrebbe comunque provare una sensazione di "freddo" o "leggermente freddo" alle estremità del corpo, come le mani o i piedi.

- **Caso 3: $I_{cl,r} < IREQ_{min}$**

  In questo caso l'isolamento termico offerto dall'abbigliamento risulta essere inferiore rispetto a quello richiesto per garantire la condizione di equilibrio termico e pertanto la persona sarà sottoposto ad un progressivo raffreddamento del corpo e ad un elevato rischio di ipotermia [38]. Pertanto, per poter eliminare o quantomeno ridurre tale rischio sarà necessario:

  1) Aumentare l'isolamento termico del vestiario e verificare se è tale da garantire la condizione di neutralità termica, oppure
  2) Determinare il tempo limite di esposizione D_{lim} ed il relativo tempo di recupero D_{rec}

Il tempo limite d'esposizione D_{lim} rappresenta il massimo tempo per cui una persona può essere esposta all'ambiente severo freddo con l'abbigliamento selezionato [21] ed oltre il quale la sua permanenza dovrà essere interrotta [39] e viene calcolato utilizzando la seguente relazione

$$D_{lim} = \frac{Q_{lim}}{\dot{S}} \tag{2.34}$$

dove Q_{lim} rappresenta la riduzione massima ammissibile di calore corporeo il cui valore viene fissato dalla norma UNI EN ISO 11079 a 144 kJ/m^2 [38] mentre $\dot{S}$ rappresenta il debito di calore accumulato (negativo) dal corpo durante la permanenza nell'ambiente severo freddo, pari a:

$$\dot{S} = M - W - E_{res} - C_{res} - E - R - C \tag{2.35}$$

Tuttavia, dal momento che R e C dipendo temperatura dell'abbigliamento t_{cl} e poiché questa rappresenta un'incognita del problema, per poter determinare il debito di calore sarà necessario risolvere il seguente

sistema adottando una procedura interattiva nelle variabili S e t_{cl} in cui, a differenza della precedente, il valore dell'isolamento termico dell'abbigliamento I_{cl} è noto. Pertanto, il sistema da risolvere è il seguente

$$\begin{cases} \dot{S} = M - W - E_{res} - C_{res} - E - R - C \\ t_{cl} = t_{sk} - I_{cl,r}\,(M - W - E_{res} - E - S \end{cases} \tag{2.36}$$

A seguito dell'esposizione all'ambiente severo freddo, per poter tornare all'equilibrio termico il corpo dovrà permanere per un certo tempo in un ambiente di recupero termico [38] in modo tale da riportare la temperatura corporea entro i limiti fisiologici. Tale periodo prende il nome di tempo recupero D_{rec} è può essere valutato utilizzando la seguente relazione

$$D_{rec} = \frac{Q_{lim}}{\dot{S}} \tag{2.37}$$

dove Q_{lim} è pari a 144 kJ/m^2 in quanto si presuppone che il recupero termico inizi non appena venga raggiunto il tempo limite di esposizione [38] mentre $\dot{S}$ rappresenta il debito di calore da recuperare (positivo). La procedura analitica di valutazione del D_{rec} è analoga a quella utilizzata per il calcolo del D_{lim}, con la differenza che questa volta sarà necessario fare riferimento alle caratteristiche dell'ambiente di recupero termico [21;38].

2.4.2 La valutazione del discomfort locale

Qualora in una ambiente severo freddo l'isolamento offerto dall'abbigliamento sia sufficiente a prevenire eventuali condizioni di stress termico, la persona esposta potrebbe comunque avvertire una sensazione di freddo in alcune parti specifiche del suo corpo, come ad esempio le mani e i piedi [21]. Pertanto, sebbene non sia presente un metodo di valutazione unificato [38], la norma UNI EN ISO 11079 [38] prevede, a seconda della tipologia e modalità con le quali il raffreddamento localizzato avviene, le seguenti metodologie di analisi:

- **Raffreddamento locale dovuto al vento (convective cooling)**

L'effetto combinato del vento e delle basse temperature può portare ad un rapido raffreddamento delle parti esposte del corpo, in particolare le mani e il volto [38]. Il raffreddamento locale dovuto all'effetto del vento viene valutato utilizzando la *Wind Chill Temperature* t_{wc}, ovvero la temperatura dell'ambiente che produce la stessa sensazione di raffreddamento nell'ambiente in esame qualora la velocità del vento sia pari a 4,2 km/h [21], la quale viene è definita dalla seguente equazione [38]

$$t_{WC} = 13{,}12 + 0{,}6215\, t_a - 11{,}37\, v_a^{0,16} + 0{,}396\, t_a v_a^{0,16} \tag{2.38}$$

dove t_a rappresenta la temperatura dell'aria mentre v_a la velocità del vento a 10m dal suolo v_{10}. Una volta determinata tale temperatura, è possibile valutare il livello di rischio ed i relativi effetti sulla persona facendo riferimento alla tabella dell'*Allegato D* [38].

Classe di rischio	Intervallo temperatura vento freddo (twc)	Sensazione termica e possibil effetti
1	- 24 °C ÷ - 15 °C	Discomfort freddo
2	- 34 °C ÷ - 25 °C	Molto freddo Rischio di congelamento della pelle
3	- 60 °C ÷ - 35 °C	Freddo pungente la pelle esposta potrebbe congelare in 10 minuti
4	≤ - 60 °C	Estremamente freddo la pelle esposta potrebbe congelare in 2 minuti

Tabella 2.4.2: Classificazione rischio ed effetti legati al vento freddo [38]

- **Raffreddamento locale dovuto al contatto con superfici fredde (conductive cooling)**

Il raffreddamento locale per conduzione avviene qualora la persona entri direttamente in contatto con una superficie fredda ed è causato dallo scambio termico conduttivo K tra la pelle della persona e la superficie fredda [38] e dipende non solo dalla temperatura, ma anche dalla conducibilità termica della superficie di contatto e dall'area della superficie di contatto [39].

La norma UNI EN ISO 11079 non definisce alcun metodo di valutazione, ma rimanda invece alla norma UNI EN ISO 13732-3 [41] la quale consente di individuare la temperatura limite della superfice tramite l'utilizzo di una serie di diagrammi in funzione della tipologia di materiale, della modalità e della durata del contatto. Inoltre tale normativa prevede, qualora la temperatura della superficie sia inferiore alla temperatura limite di riferimento, di intervenire con misure di tipo tecnico (come isolare termicamente la superficie), organizzativo (ad esempio tramite la formazione e l'informazione dei lavoratori e la pianificazione del lavoro considerando le condizioni atmosferiche) o con l'utilizzo di dispositivi di protezione individuale come guanti isolanti [41].

- **Raffreddamento locale dovuto al raffreddamento delle estremità (extremity cooling)**

Qualora in un ambiente severo freddo la persona indossi un abbigliamento e/o indumenti protettivo inadeguati [38], al fine di evitare che la temperatura corporea scenda al di sotto dei 36 °C, si attiva il meccanismo fisiologico della vasocostrizione, il quale porta ad una riduzione del flusso sanguigno verso le aree periferiche del corpo, come le dita o i piedi, causandone il raffreddamento indesiderato [39].

Pertanto, il raffreddamento delle estremità può essere valutato considerando le temperature di riferimento delle dita riportate all'*Allegato B* [38] per le due condizioni fisiologiche di stress termico ed eventualmente ridotto utilizzando guanti e/o calzature isolanti adeguati alle condizioni climatiche locali [38].

- **Raffreddamento locale dovuto al raffreddamento delle vie respiratorie (airway cooling)**

Il raffreddamento delle vie aeree è causato dagli scambi termici convettivi che avvengono tra l'aria fredda inalata e le membrane mucose delle prime vie aeree [21] e dipende non soltanto dalla differenza di temperatura aria-membrane, ma anche dalla portata d'aria inalata [38] che sarà tanto maggiore quanto più è elevato l'intensità dell'attività fisica.

La norma UNI EN ISO 11079 [38] prevede di valutare il raffreddamento locale delle vie respiratorie considerando la temperatura limite dell'aria inalata in funzione dell'intensità dell'attività metabolica e raccomanda l'adozione di disposizioni di protezione delle vie respiratorie qualora la temperatura dell'aria sia inferiore a tali valori limite [38].

CAPITOLO 3

I PARAMETRI MICROCLIMATICI

I metodi di analisi dei parametri ambientali e soggettivi

3.1 La valutazione dei parametri ambientali – Norma UNI EN ISO 7726

Nell'ambito della valutazione dell'ergonomia degli ambienti termici, le metodologie di analisi che consentono di stimare gli indici di comfort/discomfort e dello stress termico a cui le persone sono sottoposte richiedono la conoscenza di una serie di parametri ambientali e soggettivi. In particolari le grandezze fisiche necessarie alla determinazione degli indici microclimatici negli ambienti moderabili e vincolati sono [12;43]:

- La temperatura dell'aria t_a, espressa in gradi Celsius [°C];
- L'umidità assoluta dell'aria W_a, espressa come pressione parziale di vapore acqueo p_a in kilopascal [kPa];
- La velocità dell'aria v_a, espressa in metri al secondo [m/s];
- La temperatura media radiante t_r, la quale viene normalmente determinata indirettamente a partire dalla temperatura del globo nero t_g. Entrambe le temperature sono espresse in gradi Celsius [°C];
- La temperatura naturale del bulbo umido t_{nw}, espressa in gradi Celsius [°C].

Invece, qualora sia necessario eseguire una valutazione delle condizioni di discomfort locale si dovranno determinare una serie di parametri ambientali aggiuntivi [12], ovvero:

- La temperatura delle superfici t_s, espressa in gradi Celsius [°C];
- La temperatura piana radiante t_{pr}, espressa in Watt al metro quadro [W/m^2].

Di conseguenza poiché le diverse metodologie di analisi richiedono necessariamente la conoscenza dei parametri ambientali che caratterizzano l'ambiente termico [44], le caratteristiche minime degli strumenti di misura da utilizzare nonché le procedure ed i relativi metodi di valutazione devono fare riferimento a quelli proposti dalla normativa UNI EN ISO 7726 [43] nella quale vengono riportate le principali caratteristiche strumentali, gli intervalli di misura, ed i minimi tempi di risposta [43]. Nello specifico, qualora l'ambiente termico oggetto della valutazione sia classificabile come moderabile, le minime caratteristiche strumentali dovranno rientrare in categoria C, mentre dovranno rientrare in categoria S qualora la valutazione avvenga in un ambiente in cui siano presenti vincoli tali da provocare nelle persone una condizione di stress termico maggiore [43].

GRANDEZZA FISICA	**Classe C (comfort)**			**Classe S (stress termico)**		
	Intervallo di misura	**Accuratezza**		**Intervallo di misura**	**Accuratezza**	
Temperatura dell'aria, t_a	10 °C - 40 °C	Richiesta	± 0,5 °C	- 40 °C - 120 °C	Richiesta *(da - 40 °C a 0 °C)*	± (0,5 + 0,01 $\lvert t_a \rvert$) °C
					Richiesta *(da 0 °C - 50 °C)*	± 0,5 °C
		Desiderabile	± 0,2 °C		Richiesta *(da 50 °C a 120 °C)*	± [0,5 + 0,04 (t_a - 50)] °C
					Desiderabile	Accuratezza Richiesta / 2

GRANDEZZA FISICA	Classe C (comfort)			Classe S (stress termico)		
	Intervallo di misura	**Accuratezza**		**Intervallo di misura**	**Accuratezza**	
Temperatura media radiante, t_r	10 °C - 40 °C	Richiesta	± 2 °C	- 40 °C - 150 °C	Richiesta *(da - 40 °C a 0°C)*	± (5 + 0,02 $\|t_r\|$) °C
					Richiesta *(da 0 °C a 50 °C)*	± 5 °C
					Richiesta *(da 50 °C a 150 °C)*	± [5 + 0,08 (t_r - 50)] °C
		Desiderabile	± 0,2 °C		Desiderabile *(da - 40 °C a 0°C)*	± (0,5 + 0,01 $\|t_r\|$) °C
					Desiderabile *(da 0 °C a 50 °C)*	± 0,5 °C
					Desiderabile *(da 50 °C a 150 °C)*	± [0,5 + 0,04 (t_r - 50)] °C
Pressione parziale del vapore acqueo, p_a	0,5 kPa - 3,0 kPa	Richiesta	± 0,15 kPa	0,5 kPa - 6,0 kPa	Richiesta	± 0,15 kPa
		Desiderabile	-		Desiderabile	-
Velocità dell'aria, v_a	0,05 m/s - 1 m/s	Richiesta	(0,05 + 0,05 v_a) m/s	0,2 m/s - 20 m/s	Richiesta	(0,1 + 0,05 va) m/s
		Desiderabile	(0,02 + 0,07 v_a) m/s		Desiderabile	(0,05 + 0,05 va) m/s
Temperatura naturale del bulbo umido, t_{wn}	5 °C - 40 °C	Richiesta	± 0,5 °C	5 °C - 40 °C	Richiesta	± 0,5 °C
		Desiderabile	-		Desiderabile	-

Tabella 3.1.1 Intervallo di misura e accuratezza minima strumentale necessaria ai fini della valutazione degli indici di comfort/discomfort globale e gli indici di stress termico (tratta dalla Tabella 2 della UNI EN ISO 7726 [43] e dall'Allegato B della UNI EN ISO 7243 [35])

Tuttavia, sebbene la normativa definisca le caratteristiche minime della strumentazione da utilizzare essa non riporta alcuna indicazione in merito alla periodicità con la quale la strumentazione debba essere sottoposta a taratura [21]. In assenza di indicazioni normative [12], la verifica delle caratteristiche costruttive degli strumenti di misura utilizzati dovrà essere effettuata con cadenza almeno biennale presso centri di taratura abilitati [12;44].

Per quanto riguarda le metodologie di valutazione dei parametri ambientali, la norma UNI EN ISO 7726 [43] afferma che le caratteristiche fisiche dell'ambiente termico oggetto della valutazione possono variare nel tempo e nello spazio e di conseguenza prevede che:

- Qualora vi sia una variabilità spaziale, ovvero in presenza di un ambiente non eterogeneo, i parametri ambientali dovranno essere valutati in prossimità delle postazioni lavorative nelle quali avvengono le principali attività lavorative [12;43] e pertanto i parametri da utilizzare nella valutazione degli indici di comfort/discomfort e stress termico saranno i valori medi ottenuti in tali postazioni [43];
- Qualora vi sia una variabilità temporale, ovvero in presenza di un ambiente in regime non stazionario, sarà necessario considerare la variabilità temporale delle grandezze fisiche e pertanto i parametri ambientali da utilizzare nella valutazione degli indici di comfort/discomfort e stress termico dovranno essere i valori medi di quelli ottenuti durante la misurazione [43].

Invece per poter rilevare correttamente le misure dei parametri fisici di interesse, la normativa riporta nella *Tabella 5* [43] le altezze alle quali posizionare i vari sensori. Nell'ipotesi che l'ambiente in cui vengono effettuate le misure sia verticalmente omogeneo, ossia in assenza di stratificazioni verticale della temperatura, gli strumenti di misura dovranno essere posizionati all'altezza dell'addome [45].

Posizione dei sensori	**Altezza raccomandata**	
	Seduto	***In piedi***
Al livello della testa	1,1 m	1,7 m
Al livello dell'addome	0,6 m	1,1 m
Al livello delle caviglie	0,1 m	0,1 m

Tabella 3.1.2: Altezza raccomandata per il corretto posizionamento degli strumenti di misura [43]

Tuttavia, nonostante l'ovvia esistenza di una variabilità su scala giornaliera e stagionale dei parametri fisici, la norma UNI EN ISO 7726 [43] non dà alcuna indicazione in merito al momento della giornata o al periodo dell'anno in cui eseguire i rilievi strumentali. A tal proposito, la *Linea Guida INAIL* [12] afferma che la valutazione dei parametri fisici potrà essere effettuata in qualsiasi momento della giornata e dell'anno qualora il luogo oggetto della valutazione sia un ambiente indoor caratterizzato da condizioni microclimatiche indipendenti da quelle esterne. In caso contrario, ossia in presenza di un ambiente outdoor o di un ambiente indoor influenzato direttamente dalle condizioni metereologiche esterne, la valutazione dei parametri ambientali dovrà essere effettuata nelle condizioni termo-igrometriche peggiori fra quelle che si ripetono regolarmente [12]. La *Linea Guida INAIL* [12] riporta che le condizioni di "massimo rischio ricorrente" che devono essere considerate per poter eseguire correttamente la misurazione dei parametri ambientali sono:

- Nel caso di valutazione del discomfort / stress termico caldo, nelle ore centrali dei mesi estivi [12] e potranno essere ritenute attendibili qualora la temperatura massima dell'aria esterna sia non inferiore alla temperatura media del mese più caldo [12];
- Nel caso di valutazione del discomfort / stress termico freddo, nelle prime ore del mattino nei mesi invernali [12] e potranno essere ritenute attendibili qualora la temperatura media dell'aria esterna non sia superiore alla temperatura media del mese più freddo [12];

Oltre a non specificare il momento della giornata e del periodo dell'anno in cui eseguire la valutazione dei parametri ambientali, la norma UNI EN ISO 7724 [43] non fornisce alcuna indicazione in merito al tempo di misura necessario affinché tali parametri siano statisticamente rappresentativi della condizione in esame. A tal proposito, la *Linea Guida INAIL* [12] raccomanda di eseguire le misurazioni dei parametri ambientali dopo che tutte le sonde abbiano raggiunto la condizione di equilibrio termodinamico con l'ambiente [12;44] ed afferma che, al netto del *tempo di risposta*[15] dello strumento di misura avente maggior inerzia, un tempo di

[15] *Tempo di risposta*: il tempo di risposta è il tempo che un sensore, posto in un nuovo ambiente termico, impiega a rilevare le nuove condizioni ambientali [46]. Solitamente si parla di T_{90} e di T_{95}, ovvero il tempo che il sensore impiega rispettivamente a rilevare il 90% ed il 95% della variazione del parametro fisico misurato.

misura pari a 3 minuti sia da considerarsi sufficiente a garantire una rappresentazione accurata di tutte le variabili fisiche [12].

Di seguito vengono riportare le definizioni ed i principali strumenti di misura che vengono utilizzati per eseguire la valutazione dei parametri fisici richiesti per eseguire la valutazione degli indici di comfort/discomfort globale e degli indici di stress termico illustrati al *Capitolo 2* [43].

3.1.1 La temperatura dell'aria t_a

La temperatura dell'aria t_a, detta anche temperatura dell'aria a bulbo secco, rappresenta la temperatura dello strato d'aria che circonda la persona [12;44] e può essere valutata facendo uso di termometri ad espansione (a liquido o gas), termoresistori (termometri a resistenza variabile o termocoppie) o termomanometri [43].

Figura 3.1.1: Sonda termoigrometrica

Per poter effettuare correttamente la misura della temperatura dell'aria sarà necessario:

- Ridurre l'effetto delle sorgenti radianti, ad esempio posizionando degli schermi tra la sorgente radiante e il sensore, poiché se la sonda viene esposta direttamente alla sorgente la temperatura misurata risulta essere una temperatura intermedia tra la temperatura dell'aria e la temperatura radiante [43];
- Effettuare la misura tenendo conto del tempo di risposta dello strumento di misura. A tal proposito, la norma UNI EN ISO 7724 [43] raccomanda prima di effettuare le misure di attendere per un tempo almeno pari a 1,5 volte il tempo di risposta del sensore utilizzato [43].

3.1.2 L'umidità assoluta dell'aria e la pressione parziale di vapor acqueo p_a

Per poter calcolare gli scambi termici evaporativi (ossia E ed E_{res}) che avvengono tra il corpo della persona e l'ambiente circostante, è necessario determinare l'*umidità assoluta dell'aria W_a*[16] dal momento che questa è in grado di influenzare il tasso di evaporazione del sudore [43]. Tuttavia, nelle formule che consentono di

[16] *Umidità assoluta dell'aria W_a:* l'umidità assoluta dell'aria W_a rappresenta il rapporto tra la massa di vapore acqueo e la massa di aria secca in un metro cubo d'aria e può essere valutata attraverso l'uso di sonde igrometriche a sali di cloruro di litio, a capello o a punto di rugiada [12].

eseguire la valutazione degli indici di comfort/discomfort globale ed in quelle relative agli indici di stress termico, tale parametro viene espresso come *pressione parziale di vapore acqueo* p_a[17], la quale può essere definita in funzione dell'umidità assoluta secondo la seguente relazione:

$$W_a = 0{,}6220 \frac{p_a}{p - p_a} \tag{3.1}$$

In alternativa, la pressione parziale del vapore d'acqueo p_a può essere valutata facendo uso dei diagrammi psicometrici oppure a partire dal valore dall'*umidità relativa e*[18] (espressa in percentuale RH) mediante le seguenti relazioni:

$$p_{as} = 0{,}611 \times e^{\left(\frac{17.27 \times t_a}{t_a + 273{,}15}\right)} \tag{3.2}$$

$$RH = 100 \times \frac{p_a}{p_{as}} \tag{3.3}$$

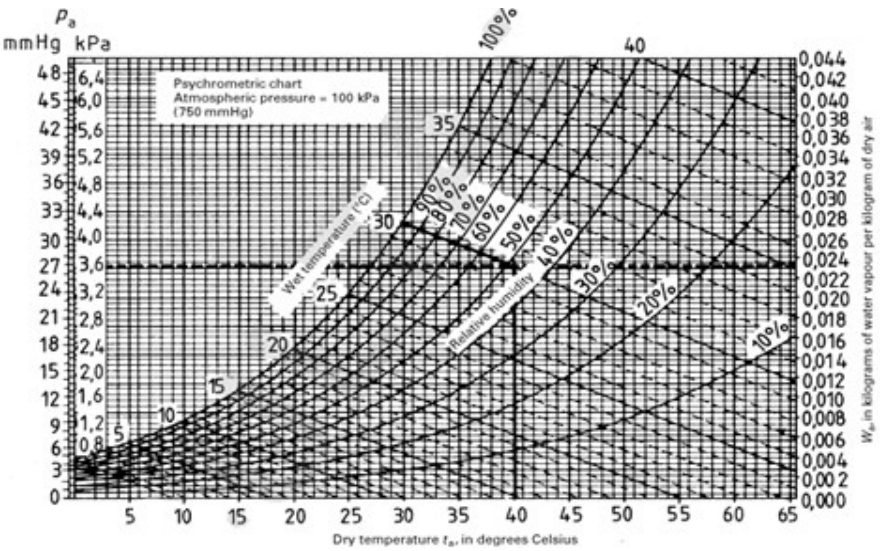


Figura 3.1.2: Diagramma psicometrico [43]

3.1.3 La velocità dell'aria v_a

La velocità dell'aria v_a è una grandezza vettoriale definita dall'intensità e dalla direzione del flusso d'aria [43] che può essere calcolata a partire da somma vettoriale della velocità dell'aria misurata nelle tre direzioni spaziali ed è quindi definita dalla seguente relazione

$$v_a = \sqrt{{v_x}^2 + {v_y}^2 + {v_z}^2} \tag{3.4}$$

[17] <u>*Pressione parziale di vapore acque p_a:*</u> la pressione parziale di vapore acqueo è la pressione esercitata dalle molecole di vapore acqueo se questo occupassero da sole il volume d'aria umidita alla stessa temperatura [43] dove l'aria umida è una miscela costituita da vapore acqueo e da altri gas, come l'ossigeno e l'idrogeno, che rendono l'aria secca

[18] <u>*Umidità relativa e:*</u> l'umidità relativa dell'aria rappresenta il rapporto tra la pressione parziale del vapore acqueo e la tensione di vapore saturo, ossia la massima pressione di vapore d'acqua ammessa nell'aria alla stessa temperatura p_{as} [12;43]. Tale valore può essere valutato mediante sonde psicrometriche, le quali vengono normalmente integrate nei sensori di temperatura dell'aria a bulbo secco (sonda termoigrometrica) [12].

Gli strumenti di misura che vengono utilizzati per la valutazione della velocità dell'aria sono gli anemometri ad elemento caldo, come ad esempio gli anemometri a sfera calda o filo caldo [12;43], e nello specifico la norma tecnica [43] consiglia l'uso di sensori omnidirezionali (anemometro a sfera calda) poiché questi sono in grado di ottenerne una migliore stima. Tuttavia, qualora la velocità del flusso d'aria sia molto bassa e/o non sia presente una direzione dominante del flusso, l'utilizzo di un anemometro unidirezionale (anemometro a filo caldo) può portare ad errori pressoché trascurabili nella stima degli indici comfort/discomfort e stress termico [12].

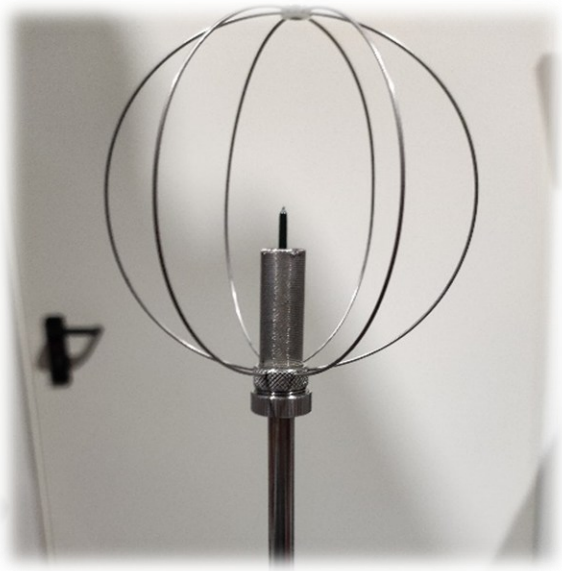


Figura 3.1.3: Anemometro a sfera calda

3.1.4 La temperatura media radiante t_r e la temperatura del globo nero t_g

La temperatura media radiante t_r rappresenta la temperatura di una cavità immaginaria che circonda la persona e che scambia con essa una quantità di calore per irraggiamento pari a quella che viene scambiata tra la persona e l'ambiente termico circostante [12]. Tale temperatura può essere valutata direttamente tramite l'utilizzo di radiometri o indirettamente mediante l'uso di un globotermometro.

Il globotermometro consiste in un globo di rame ricoperto da vernice nera di diametro D ed emissività ε_g al cui interno viene posizionato un sensore di temperatura che consente, grazie alla sua forma sferica, di misurare la temperatura t_g [12] come l'integrazione del valore medio della radiazione proveniente da tutte le superfici presenti nell'ambiente [12]. Le relazioni che legano la temperatura radiante t_r alla temperatura del globotermometro t_g sono le seguenti:

- In caso di convezione naturale, la temperatura media radiante viene determinata secondo la relazione

$$\bar{t_r} = \left[\left(t_g + 273\right)^4 + \frac{0{,}25 \times 10^8}{\varepsilon_g} \left(\frac{\left|t_g - t_a\right|}{D} \right)^{1/4} \times \left(t_g - t_a\right) \right]^{1/4} \tag{3.4}$$

- In caso di convezione forzata, ovvero qualora siano presenti ventilatori o altri sistemi di condizionamento in grado di influenzare la velocità dell'aria, la temperatura media radiante viene definita non soltanto in funzione delle caratteristiche del globotermometro e delle temperature t_a e t_g, ma anche in funzione della velocità dell'aria v_a secondo la relazione

$$\bar{t_r} = \left[\left(t_g + 273\right)^4 + \frac{1{,}1 \times 10^8 \times v_a^{0,6}}{\varepsilon_g \times D^{0,4}} \times \left(t_g - t_a\right) \right]^{1/4} \tag{3.5}$$

Per quanto riguarda la procedura di valutazione della temperatura media radiante tramite l'utilizzo del globotermemtro, la norma UNI EN ISO 7726 [43] sottolinea che per poter ottenere dei valori attendibili prima di effettuare la misura è necessario attendere tempi molto lunghi data l'elevata inerzia termica dello strumento (tempo di risposta superiore ai 15 - 20 minuti) [12]. Di conseguenza il globotermometro potrà essere utilizzato soltanto in ambienti che presentano una variabilità temporale nell'emissione delle sorgenti radianti trascurabile.

Figura 3.1.4 Globotermometro

3.1.5 La temperatura neutra del bulbo umido t_{nw}

La temperatura neutra del bulbo umido t_{nw} è la temperatura misurata da un sensore coperto da uno stoppino bagnato posizionato in un ambiente in condizioni di ventilazione naturale [35] e serve a rappresentare l'effetto refrigerante dell'evaporazione [47] del sudore sulla pelle della persona. Tale parametro ambientale può essere determinato direttamente tramite l'utilizzo di un termometro neutro a bulbo umido [35] o indirettamente mediante l'ausilio dei diagrammi psicometrici [47].

Le caratteristiche costruttive, la sensibilità e l'accuratezza richiesta del sensore vengono riportate nella norma UNI EN ISO 7243 [35], nella quale viene evidenziato che per poter ottenere valori accurativi di t_{nw} la parte sensibile del sensore deve essere coperta per intero da uno stoppino in materiale ad elevato assorbimento (ad esempio cotone) ed avente una forma tale da garantirne un'aderenza adeguata.

Figura 3.1.5: Sonda di temperatura a bulbo umido

3.2 La valutazione dei parametri soggettivi

Nell'ambito della valutazione dell'ergonomia termica, per poter valutare gli indici di comfort/discomfort e la condizione di stress termico, oltre alla valutazione dei parametri ambientali è necessario saper definire adeguatamente anche i parametri che caratterizzano l'abbigliamento indossato e la tipologia di attività svolta, ovvero l'isolamento termico dell'abbigliamento I_{cl} e il metabolismo energetico M. Tuttavia, a differenza dei parametri fisici che possono essere facilmente quantificati tramite appositi sensori, in un contesto operativo la valutazione diretta dei parametri soggettivi risulta assai più complessa a causa della particolarità e dei costi delle attrezzature richieste. Le norme tecniche internazionali che definisco le metodologie di valutazione del metabolismo energetico e dell'isolamento termico del vestiario sono:

- La norma UNI EN ISO 9920 [25], la quale, oltre a definire le principali caratteristiche termiche dell'abbigliamento, propone anche i valori di isolamento termico I_{cl} di numerosi capi d'abbigliamento;
- La norma UNI EN ISO 8996 [20], la quale definisce le quattro metodologie di valutazione del metabolismo energetico M.

3.2.1 Le caratteristiche termiche dell'abbigliamento – Norma UNI EN ISO 9920

Indipendentemente dalla tipologia di ambiente termico in esame, la sensazione termica e la condizione di stress termico provata dall'individuo dipendono non soltanto dalle condizioni ambientali, ma anche dalla tipologia di vestiario indossato [48] poiché da questo dipendono gli scambi termici che avvengono tra la persona e l'ambiente circostante. Infatti, come evidenziato dallo studio condotto da *R. Tuğrul OGULATA* [48], la tipologia e l'isolamento termico del vestiario sono tra le principali caratteristiche in grado di influenzare gli scambi termici per conduzione, convezione ed irraggiamento oltre alle perdite di calore per effetto della sudorazione. All'aumentare dell'isolamento termico si può infatti osservare come la somma delle potenze termiche scambiate per convezione e dell'irraggiamento aumenta mentre diminuisce quella per effetto della sudorazione e della convezione, anche se la variazione di quest'ultima è pressoché trascurabile. Non dipendono dalle caratteristiche termiche del vestiario gli scambi termici che avvengono durante la respirazione [48].

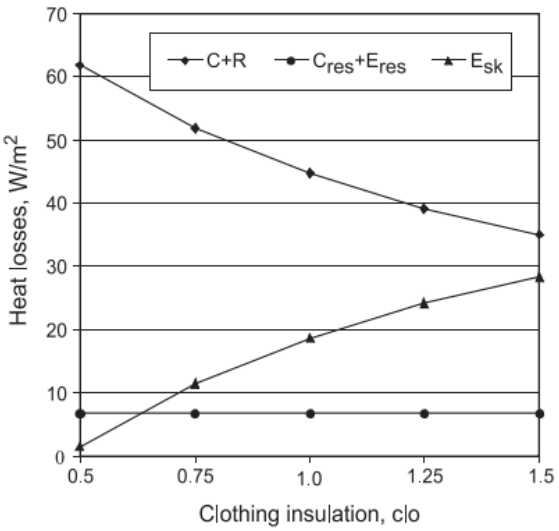


Figura 3.2.1 Variazione della potenza termica scambiata per effetto dell'abbigliamento [48].

A riprova dell'importanza che l'abbigliamento riveste nella valutazione delle condizion microclimatiche basti pensare che, a differenza degli ambienti moderabili in cui gli occupanti possono scegliere liberamente come vestirsi, negli ambienti severi una scelta errata dalla tipologia di vestiario può favorire l'insorgere di patologie correlate allo stress termico; pertanto in tale tipologia di ambienti l'abbigliamento dovrà essere definito in funzion delle condizioni microclimatiche presente e della tipologia di ciclo produttivo [12].

Per poter eseguire una corretta analisi della condizione di comfort/discomfort nonché dello stress termico a cui la persona è sottoposta nell'ambiente termico in cui si trova sarà necessario definire correttamente la tipologia di vestiario indossato e la norma che consente di valutarne *l'isolamento termico dell'abbigliamento I*[19] è la UNI EN ISO 9920 [25]. Tuttavia, poiché gli scambi termici che avvengono tra l'individuo e l'ambiente circostante coinvolgono non soltanto l'abbigliamento ma anche lo strato limite d'aria attorno ad esso, tale normativa definisce nelle *condizioni statiche di riferimento*[20] i seguenti isolamenti termici:

- **Isolamento termico intrinseco dell'abbigliamento I_{cl}**, ovvero l'isolamento termico tra la pelle e la superficie esterna dell'abbigliamento, incluso lo strato d'aria tra la pelle e la superficie interna del vestiario [25]. Definita la temperatura media della pelle e della superficie esterna del vestiario rispettivamente come t_{sk} e t_{cl}, l'isolamento del vestiario viene definito nelle condizioni statiche dalla seguente relazione:

$$I_{cl} = \frac{\overline{t_{sk}} - t_{cl}}{C + R} \tag{3.6}$$

- **Isolamento termico dello strato d'aria I_a**, ovvero l'isolamento termico tra lo strato più esterno dell'abbigliamento e lo strato limite d'aria intorno alla persona [25;26] il quale non dipende dalla tipologia di vestiario indossato [12]. L'isolamento termico I_a viene definito nelle condizioni statiche dalla seguente relazione:

$$I_a = \frac{\overline{t_{cl}} - t_o}{C + R} \tag{3.7}$$

  In alternativa, l'isolamento termico I_a può essere determinato in funzione dei coefficienti di scambio termico per convezione h_c e per irraggiamento h_r secondo la relazione:

$$I_a = \frac{1}{(h_c + h_r)} \tag{3.8}$$

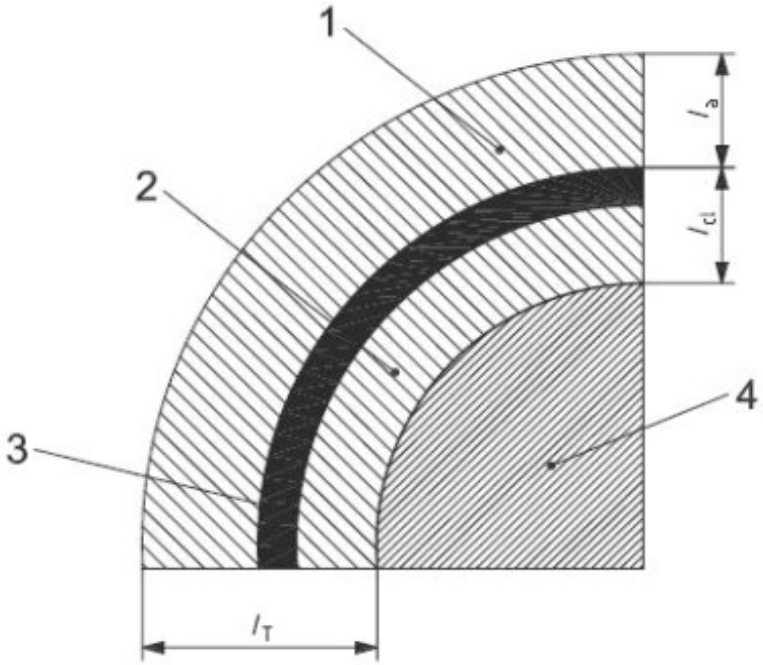
- **Isolamento termico totale I_T**, il quale corrisponde all'isolamento termico presente tra la superficie del corpo e l'ambiente circostante e che pertanto comprende sia il vestiario indossato e lo strato d'aria

[19] *Isolamento termico:* l'isolamento termico I rappresenta la resistenza alle perdite di calore secco H, ossia la somma delle perdite di calore che avvengono per convezione ed irraggiamento, tra due superfici [25]. L'unità di misura con cui l'isolamento termico viene normalmente indicato è il *clo*, che in unità di misura del sistema internazionale a 1 clo = 0,155 $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$.

[20] *Condizione statiche di riferimento:* le condizioni statiche di riferimento corrispondono a quelle relative ad una persona ferma, seduta e con una velocità del vento inferiore a 0,2 m/s. Qualora le condizioni dell'ambiente termico in esame differiscano dalle condizioni di riferimento (condizioni dinamiche) sarà necessario utilizzare i coefficienti correttivi proposti dalla normativa [25]

interno, sia lo strato limite d'aria intorno alla persona [25]. Una volta individuato il fattore d'area dell'abbigliamento f_{cl} come il rapporto tra la superficie della persona coperta e quella scoperta, l'isolamento termico totale I_t può essere determinato in funzione di I_{cl} e di I_a secondo la relazione

$$I_T = I_{cl} + \frac{I_a}{f_{cl}} \tag{3.9}$$



1 Aria esterna
2 Aria interna
3 Vestiario
4 Corpo

Figura 3.2.2. Rappresentazione schematica degli strati limite che separano il corpo dall'ambiente circostante [12]

Nelle condizioni statiche di riferimento, l'isolamento termico totale I_T e l'isolamento intrinseco dell'abbigliamento I_{cl} possono essere ottenuti facendo riferimento ai valori riportati nell'*Allegato A* in funzione del vestiario indossato [25], oppure a partire dall'isolamento termico dei singoli capi d'abbigliamento I_{clu} proposti all'*Allegato B* [25] utilizzando la seguente relazione:

$$I_{cl} = 0{,}161 + 0{,}835 \sum I_{clu} \tag{3.10}$$

Abbigliamento da lavoro	I_{cl} clo	Abbigliamento giornaliero	I_{cl} clo
Mutande, tuta, calzini, scarpe	0,70	Slip, maglietta, pantaloncini, calzini leggeri, sandali	0,30
Mutande, camicia, tuta, calzini, scarpe	0,80	Mutande, camicia con maniche corte, pantaloni leggeri, calzini leggeri, scarpe	0,50
Mutande, camicia, pantaloni, grembiule, calzini, scarpe	0,90	Slip, sottoveste, calzini, abito, scarpe	0,70
Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, giacca, calzini, scarpe	1,00	Biancheria intima, camicia, pantaloni, calzini, scarpe	0,70
Biancheria intima a gambe e maniche lunghe, giacca termica, calzini, scarpe	1,20	Slip, camicia, pantaloni, giacca, calzini, scarpe	1,00
Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, giacca, giacca con imbottitura pesante e tuta, calzini, scarpe, berretto, guanti	1,40	Slip, calze, blusa, gonna lunga, giacca, scarpe	1,10
Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, giacca, giacca con imbottitura pesante e tuta, calzini, scarpe	2,00	Biancheria intima a maniche e gambe lunghe, camicia, pantaloni, maglione con scollo a V, giacca, calzini, scarpe	1,30

Capo di abbigliamento	I_{clu} clo
Biancheria intima	
Slip	0,03
Mutande a gambe lunghe	0,10
Maglia	0,04
Maglietta	0,09
Maglia a maniche lunghe	0,12
Camicie - Bluse	
Maniche corte	0,15
Leggere, a maniche lunghe	0,20
Normali, a maniche lunghe	0,25
Di flanella, a maniche lunghe	0,30
Blusa leggera a maniche lunghe	0,15
Pantaloni	
Corti	0,06
Leggeri	0,20
Normali	0,25
Di flanella	0,28
Maglioni	
Gilet	0,12
Maglione leggero	0,20
Maglione	0,28
Maglione pesante	0,35
Giacche	
Giacca leggera estiva	0,25
Giacca	0,35
Grembiule	0,30

Tabelle 3.2.1 e 3.2.2 Isolamento termico dato dalla combinazione tipiche di capi d'abbigliamento I_{cl} (a sinistra) e dei singoli capi d'abbigliamento $I_{cl,u}$ (a destra) [18]

Tuttavia, le precedenti relazioni e i valori di isolamento termico riportati nell'*Allegato A* e *Allegato B* [25] fanno riferimento alle condizioni statiche e dunque non tengono conto dell'influenza dell'attività svolta e dell'effetto della ventilazione sull'isolamento termico dell'abbigliamento e sullo strato d'aria attorno ad esso [18;25]. Pertanto, nelle condizioni dinamiche sarà necessario adottare dei coefficienti corretti e, nel caso in cui la persona indossi capi d'abbigliamenti aventi un isolamento termico I_{cl} compreso tra 0,6 e 1,4 clo, le formule da adottare sono:

$$I_{cl,r} = I_{T,r} - \frac{I_{a,r}}{f_{cl}} \tag{3.11}$$

$$I_{a,r} = corrI_a \times I_{a,static} = e^{[-0{,}533 \times (v_{ar}-0{,}15) + 0{,}069 \times (v_{ar}-0{,}15)^2 - 0{,}462\, v_w + 0{,}201\, v_w^2]} \times I_{a,static} \tag{3.12}$$

$$I_{T,r} = corrI_T \times I_{T,static} = e^{[-0{,}281 \times (v_{ar}-0{,}15) + 0{,}044 \times (v_{ar}-0{,}15)^2 - 0{,}492\, v_w + 0{,}176\, v_w^2]} \times I_{T,static} \tag{3.13}$$

dove v_{ar} e v_w sono rispettivamente la velocità relativa dell'aria riferita alla persona e la velocità di movimento della persona, entrambe espresse in $m \cdot s^{-1}$.

Oltre all'isolamento termico, un'altra caratteristica del vestiario in grado di influenzare gli scambi termici o tra la persona e l'ambiente circostante è la resistenza evaporativa R_e [25]. Analogamente alla resistenza termica, nelle condizioni statiche vengono definite tre resistenze evaporative, ossia:

- **Resistenza evaporativa intrinseca dell'abbigliamento $R_{e,cl}$**, ovvero la resistenza evaporativa tra la pelle e la superficie esterna del vestiario incluso lo strato d'aria interno [25], la quale può essere ottenuta

facendo riferimento ai valori proposti all'*Allegato C* [25] o in alternativa, noto l'indice di permeabilità dell'abbigliamento $i_{m,cl}$, facendo uso della seguente relazione

$$R_{e,cl} = 0{,}06 \times \frac{I_{cl}}{i_{m,cl}} \tag{3.14}$$

- **Resistenza evaporativa dello strato d'aria $R_{e,a}$**, ovvero la resistenza evaporativa tra lo strato più esterno dell'abbigliamento e lo strato d'aria limite intorno alla persona [25], la quale può essere ottenuta mediante la seguente relazione

$$R_{e,a} = \frac{0{,}06}{f_{cl} \times h_c} \tag{3.15}$$

- **Resistenza evaporativa totale $R_{e,T}$**, ovvero la resistenza evaporativa tra la superficie del corpo e l'ambiente circostante [25] il quale, analogamente alla definizione dell'isolamento termico totale I_T, sarà definito nelle condizioni statiche in funzione dell'isolamento termico intrinseco dell'abbigliamento I_{cl}, dell'isolamento termico dell'aria I_a e dell'indice di permeabilità complessivo i_m, secondo la relazione

$$R_{e,T} = \frac{0{,}06}{i_m}\left(I_{cl} + \frac{I_a}{f_{cl}}\right) \tag{3.16}$$

Nelle condizioni dinamiche la resistenza evaporativa totale deve tenere conto, analogamente a quanto accade per la resistenza termica totale, degli effetti della ventilazione e dell'attività svolta e, facendo riferimento al fattore correttivo utilizzato per il calcolo dell'isolamento termico totale *corr* I_T, la resistenza evaporativa totale nelle condizioni dinamiche $R_{e,T,r}$ risulta essere pari a

$$R_{e,T,r} = (0{,}3 - 0{,}5 \times corr\ I_T + 1{,}2 \times corr\ I_T^2) \times R_{e,T} \tag{3.17}$$

In alternativa, $R_{e,T,r}$ potrà essere calcolato in funzione delle velocità dell'aria rispetto alla persona in movimento v_{ar} e della velocità di movimento della persona v_m tramite la seguente relazione

$$R_{e,T,r} = e^{[-0{,}468 \times (v_{ar} - 0{,}15) + 0{,}080 \times (v_{ar} - 0{,}15)^2 - 0{,}874\, v_w + 0{,}358\ v_w^2]} \times R_{e,T} \tag{3.18}$$

3.2.2 La valutazione del metabolismo energetico – Norma UNI EN ISO 8996

Insieme all'isolamento termico dell'abbigliamento, l'altro parametro soggettivo in grado di influenzare la sensazione di comfort/discomfort e lo stress termico a cui la persona è sottoposta [20] è rappresentato dall'intensità dell'attività metabolica M, definita anche come metabolismo energetico (*metabolic rate*) o dispendio energetico. Il metabolismo energetico rappresenta *la potenza sviluppata dall'organismo*[21] dell'individuo attraverso una serie di processi di ossidazione che consentono di trasformare l'energia chimica contenuta negli alimenti in energia termica e meccanica [19;51] e dunque il costo energetico a carico del

[21] *Potenza sviluppata dall'organismo:* la potenza sviluppata dall'organismo rappresenta l'energia richiesta nell'unità di tempo necessaria a garantire il corretto mantenimento delle funzioni vitali e lo svolgimento delle diverse attività [19] e dipende, oltre che dalle condizioni ambientali in cui la persona si trova e dalla tipologia di attività svolta, da una serie di altri fattori personali: infatti fattori quali età, peso e altezza possono influenzare il valore del metabolismo energetico [20].

sistema muscolare necessario al fine di garantire il coretto mantenimento delle funzioni vitali e delle attività lavorative e non [19;20]. L'intensità dell'attività metabolica è quindi in grado di fornire una stima quantitativa dell'intensità dell'attività fisica svolta [20] e poiché tale energia viene dissipata nell'ambiente circostante attraverso la pelle, essa viene normalmente espressa in ambito termo-fisiologico per unità di superficie, ovvero in W/m^2 [20]. In alternativa, il metabolismo energetico può essere espresso Watt o in unità metaboliche *met* (*Metabolic equivalent of task*) [18], dove

$$1\ met = 58{,}2\ W/\ m^2$$

Dunque, per poter eseguire una valutazione microclimatica accurata è necessario, oltre alla valutazione dei parametri ambientali e delle caratteristiche termiche dell'abbigliamento, assumere una "figura metabolica" rappresentativa delle attività indagata ed attribuirgli un valore appropriato di dispendio energetico [20;49] e la norma tecnica che permette di valutare tale parametro è la UNI EN ISO 8996 [20]. Tale normativa definisce infatti quattro metodi di valutazione del metabolismo energetico, il quale può essere stimato sia con metodi diretti, ad esempio misurando il quantitativo di ossigeno consumato o monitorando la frequenza cardiaca durante lo svolgimento delle mansioni, sia con metodi indiretti basati sull'utilizzo dei valori riportati negli allegati [20] e la cui la semplicità di utilizzo è accompagnata da un ampio margine di errore [49]. Inoltre, indipendentemente dal metodo d'analisi adottato e dall'esperienza del valutatore, gli altri fattori in grado di influenzare l'accuratezza della valutazione del metabolismo energetico sono:

- La rappresentatività del periodo d'osservazione [20];
- Le possibili perturbazioni della normale attività da parte dell'osservatore e/o delle procedure di valutazione [20];
- Il numero di misure effettuate dal momento che, supponendo l'assenza di errori sistematici nella procedura di valutazione, all'aumentare del numero di misure è possibile ridurre gli errori della misurazione considerando il metabolismo energetico come la media dei valori dei campioni studiati [20].

Nei prossimi paragrafi verranno illustrati, in ordine crescente di precisione, i metodi di valutazione ed analisi dell'intensità dell'attività metabolica introdotti dalla UNI EN ISO 8996 [20], ovvero:

- ***Livello 1 – Controllo***: tale metodologia d'analisi prevede di valutare il metabolismo energetico attraverso la classificazione della tipologia di attività svolta e facendo uso dei prospetti riportato all'*Allegato A* [20];
- ***Livello 2 – Osservazione***: tale metodologia d'analisi richiede l'analisi dei tempi e dei movimenti consente di determinare il valore del metabolismo energetico medio facendo riferimento al contributo delle singole attività svolte in un periodo di riferimento T adeguato alla tipologia di attività svolta [20] ;
- ***Livello 3 – Analisi***: tale metodologia consente di valutare il metabolismo energetico mediante una serie di relazioni lineari in grado di correlare l'intensità dell'attività metabolica alla frequenza cardiaca HR ed altre caratteristiche individuali, tra cui il peso, l'altezza e l'età;

- ***Livello 4 – Valutazione di esperti***: tale metodologia d'analisi consente di ottenere stime molto accurate e precise del metabolismo energetico attraverso l'uso di tecniche di misurazione calorimetriche, sia dirette che indirette, o non calorimetriche (metodo della doppia marcatura dell'acqua, DLW).

La precisione dei risultati ottenuti nonché i costi delle analisi aumentano passando dal *Livello 1* al *Livello 4* [20] e per tale motivo la norma UNI EN ISO 8996 [20] raccomanda di utilizzare, per quanto possibile, il metodo di valutazione più preciso tra quelli disponibili.

3.2.2.1 Livello 1 – Controllo

Il metodo di valutazione di *Livello 1 – Controllo* (*Level 1, Screening*), è tra le quattro metodologie di analisi proposte dalla UNI EN ISO 8996 [20] quello avente il maggior grado di incertezza ma allo stesso è anche il più semplice da utilizzare poiché consiste nella valutazione del metabolismo energetico mediante l'uso dei prospetti riportati nell'*Allegato A* [20]. Nello specifico, in tale allegato le divere mansioni ed attività lavorative vengono suddivise nelle cinque principali classi di attività metabolica (a riposo, leggero, moderato, alto e molto alto) e per ciascuna di esse vengono riportati i range di metabolismo energetico corrispondenti [20;49].

Class[a]	Range of metabolic rates W	Examples
0 Resting	100 to 125	Resting, sitting at ease
1 Low metabolic rate	125 to 235	Sedentary activity (office, dwelling, school, laboratory: writing, typing, drawing, sewing, book keeping). Standing, light activity (shopping, laboratory, light industry). Hand and arm work (small bench tools, inspection, assembly or sorting of light materials). Light arm and leg work (driving vehicle in normal conditions, operating foot switch or pedal). Machining with low power tools [drilling (small parts), milling (small parts), coil winding, sawing]. Casual walking (2 km·h^{-1}) on a level, even path, solid with load ≤ 30 kg.
2 Moderate metabolic rate	235 to 360	Sustained hand and arm work (hammering in nails, filing, loading, polishing). Arm and leg work (off-road operation of lorries, tractors or construction equipment). Arm and trunk work (work with pneumatic hammer, tractor assembly, plastering). Weeding, hoeing, picking fruits or vegetables. Pushing or pulling lightweight carts or wheelbarrows. Bricklaying, 5 bricks/min. Intermittent handling of moderately heavy material. Walking (2,5 to 5 km·h^{-1}) on a level, even path, solid with load ≤ 20 kg. Walking (2,5 to 3 km·h^{-1}) on levelled but irregular to unstable ground with load ≤ 20 kg. Walking (≤2,5 km·h^{-1}) on stable ground uphill (≤5 %) with load ≤ 20 kg.
3 High metabolic rate	360 to 465	Intense arm and trunk work with hand tools or machines. Carrying heavy material, shovelling. Sledgehammer work, sawing, planing or chiselling hard wood, hand mowing, digging. Walking (5,5 to 7 km·h^{-1}) on a level, even path, solid with load ≤ 20 kg. Walking (3,5 to 5 km·h^{-1}) on levelled but irregular to unstable ground with load ≤ 20 kg. Walking (2,5 to 3 km·h^{-1}) on stable ground uphill (≤5 %) with load ≤ 10 kg. Pushing or pulling heavily loaded hand carts or wheelbarrows. Chipping castings, concrete block laying.
4 Very high metabolic rate	> 465	Intense activity at fast to maximum pace. Working with an axe; intense shovelling or digging; climbing stairs, ramp or ladder. Walking (>7 km·h^{-1}) on a level, even path, solid, with or without load. Walking (>5 km·h^{-1}) on levelled but irregular to unstable ground with or without load. Walking (>3 km·h^{-1}) on stable ground uphill (≥5 %) with or without load. Running (>6 km·h^{-1}).

Tabella 3.2.3: Classificazione del metabolismo energetico per categorie, tratta dalla UNI EN ISO 8996 [20]

Tuttavia, nonostante l'apparente semplicità di applicazione, dal momento che la scelta del valore dipende esclusivamente dalla sensibilità e dall'esperienza del valutatore, il metodo di analisi di *Livello 1* consente di stimare il metabolismo energetico con una probabilità di errore molto elevata [20;49] ed un'incertezza non inferiore al 30 % [19].

3.2.2.2 Livello 2 - Osservazione

A differenza del metodo d'analisi precedentemente illustrato, il metodo di valutazione di *Livello 2 – Osservazione* (*Level 2, Observation*) consente di stimare il metabolismo energetico associando la tipologia di attività svolta al ciclo di lavoro tramite l'analisi dei tempi e dei movimenti [20]. Tale metodologia permette infatti di valutare il dispendio energetico considerand il contributo di ogni singola attività svolta durante il periodo di osservazione T rappresentativo del ciclo di lavoro (ad esempio, il periodo di osservazione sarà breve se il ciclo di lavoro è corto e ripetitivo) [20] e di una serie di fattori quali la postura, il metabolismo energetico a riposo M_0 e la velocità di movimento [20;49]. Nello specifico, dopo aver definito il periodo di osservazione, il metodo di *Livello 2* prevede innanzitutto di individuare le singole attività e determinare per ciascuna di esse la loro durata t_i ed il dispendio energetico M_i facendo riferimento ai prospetti ed alle formule riportate nell'*Allegato B* [20]. L'intensità dell'attività metabolica sarà quindi definita come il metabolismo energetico medio associato al periodo del ciclo di lavoro e pertanto sarà pari alla media pesata del metabolismo energetico relativo ad ogni singola attività, ovvero:

$$M = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{n} M_i \, t_i \tag{3.19}$$

A differenza del metodo di valutazione di *Livello 1*, dal momento che il metodo di analisi di *Livello 2 - Controllo* definisce il metabolismo energetico in una condizione lavorativa media è necessario definire adeguatamente il periodo d'osservazione T e dunque avere la piena conoscenza delle attività svolte e delle rispettive durate t_i [20]. L'incertezza relativa a tale metodologia d'analisi risulta essere pari al 20 % [19;20] è la probabilità di commettere errori è molto elevata [20;49] soprattutto qualora l'attività analizzate siano molto complesse ed il valutatore non sia in grado di identificare correttamente le singole attività e/o durata e/o movimenti compiuti durante tali attività.

3.2.2.3 Livello 3 – Analisi

A differenza delle metodologie d'analisi precedentemente illustrate, l'utilizzo del metodo di valutazione del metabolismo energetico di *Livello 3 – Analisi* (*Level 3, Analysis*) è rivolto esclusivamente a persone formate in materia di salute occupazionale ed in ergonomia degli ambienti termici [20] a causa della complessità richiesta per l'effettuazione delle misure e l'interpretazione dei dati.

Tra le metodologie di analisi proposte, il ***Metodo 3.A – Misurazione della frequenza cardiaca in condizioni definite*** consente di valutare il metabolismo energetico attraverso una serie di relazioni lineari in grado di correlare l'intensità dell'attività metabolica ad una serie di caratteristiche individuali, come il peso, l'altezza,

l'età e la frequenza cardiaca HR la quale dovrà essere monitorata durante lo svolgimento delle attività lavorative mediante l'utilizzo di cardiofrequenzimetri o dispositivi analoghi. Tuttavia, sebbene l'utilizzo del metodo di analisi di *Livello 3.A* consenta di ottenere una migliore stima dell'intensità dell'attività metabolica rispetto alle metodologie d'analisi precedentemente illustrate, esso potrà essere adottato soltanto qualora il lavoro compiuto sia puramente dinamico (ovvero nel caso in cui l'attività svolta coinvolga soltanto i *grandi gruppi muscolari*[22]) e nei casi in cui la frequenza cardiaca non sia influenzata dal contributo dei carichi muscolari statici, mentali e termici. Infatti, nella maggior parte dei casi, la frequenza cardiaca misurata non dipende soltanto dal carico muscolare dinamico, ma anche dal contributo delle seguenti componenti [20]:

$$HR = HR_0 + \Delta HR_M + \Delta HR_S + \Delta HR_T + \Delta HR_N + \Delta HR_E \tag{3.20}$$

dove:

- HR_0 rappresenta la frequenza cardiaca a riposo, in posizione prona ed in ambiente termico neutro [bpm];
- ΔHR_M rappresenta l'aumento della frequenza cardiaca dovuto al carico muscolare dinamico in condizioni termiche neutre [bpm];
- ΔHR_S rappresenta l'aumento della frequenza cardiaca dovuto al lavoro muscolare statico [bpm];
- ΔHR_T rappresenta l'aumento della frequenza cardiaca dovuto allo stress termico [bpm];
- ΔHR_N rappresenta l'aumento della frequenza cardiaca dovuto al carico mentale [bpm];
- ΔHR_E è l'aumento della frequenza cardiaca dovuto ad altri fattori come la variazione della frequenza respiratoria [bpm];

Di conseguenza, qualora la frequenza cardiaca dovesse essere valutata sul campo mediante l'utilizzo di apposite attrezzature (come cardiofrequenzimetri a fascia toracica o a braccio), per poter utilizzare correttamente la relazione lineare che lega il metabolismo energetico alla frequenza cardiaca, sarà necessario tenere presente che:

- Qualora l'attività venisse svolta in una ambiente caldo, la misurazione della frequenza cardiaca verrebbe influenza dallo stress termico provato dall'individuo a causa dell'incremento della componente ΔHR_T che in media è pari a 33 battiti al minuto per ogni grado di aumento della temperatura del nucleo corporeo [20;53]. Dunque, al fine di rendere trascurabile nella valutazione del metabolismo energetico la componente legata allo stress termico, la registrazione della frequenza cardiaca dovrà essere effettuata in un ambiente termico neutro o, qualora ciò non sia possibile, dovrà essere corretta facendo riferimento alla procedura d'analisi riportata nell'*Allegato E* [20]. Infatti, nell'ipotesi che l'intensità dell'attività metabolica rimanga costante durante l'intera fase di lavoro e che la temperatura corporea aumenti linearmente nel tempo, è possibile supporre che anche la componente ΔHR_T aumenti linearmente. In tali condizioni, la procedura di correzione proposta dalla normativa consente di stimare il metabolismo

[22] <u>*Grandi gruppi muscolari:*</u> i grandi gruppi muscolari sono i gruppi muscolari del corpo umano che consento di eseguire i movimenti durante lo svolgimento di una qualsiasi attività. I cinque principali gruppi muscolari deputati al movimento sono i muscoli del petto, della schiena, delle spalle, degli addominali delle gambe e dei glutei [52]

energetico facendo riferimento alla frequenza cardiaca media HR_{media} misurata durante la fase di lavoro meno la metà dell'incremento della frequenza cardiaca misurato in un ambiente termicamente neutro al quinto minuto di recupero $\Delta HR_{T,rec.5}$ [20], ovvero la differenza tra la frequenza cardiaca misura al quinto minuto di recupero $HR_{rec.5}$ e la frequenza cardiaca a riposo HR_0. Pertanto, qualora la misurazione della frequenza cardiaca dovesse essere effettuata in un ambiente severo caldo, la frequenza cardiaca che dovrà essere utilizzato ai fini della valutazione del metabolismo energetico dovrà essere pari a:

$$HR_{eff} = HR_{media} - \frac{HR_{rec,min5} - HR_0}{2} \tag{3.21}$$

- Qualora l'attiva svolta dalla persona non sia puramente dinamica, le componenti ΔHR_S, ΔHR_N e ΔHR_E possono assumere un valore non trascurabile portando ad una sovrastima del reale dispendo energetico [20]. In particolare, in un ambiente freddo, questa sovrastima potrebbe portare a sottostimare il rischio per le persone esposte, mentre in un ambiente caldo potrebbe invece portare ad una sovrastima della condizione di rischio.

Tenendo conto delle precedenti considerazioni, in un contesto lavorativo in cui le condizioni di lavoro siano totalmente dinamiche e supponendo trascurabili i carichi muscolari statici, termici e mentali, il metabolismo energetico medio M_m può essere valutato in funzione della frequenza cardiaca media HR_m misurata durante il ciclo di lavoro e delle caratteristiche del soggetto (altezza H_b, peso W_b, sesso ed età) tramite la seguente relazione lineare [20]:

$$M_m = M_0 + \frac{(HR_m - HR_0)}{RM} \tag{3.22}$$

dove i termini che compongono tale equazione rappresentano

- M_0 è il metabolismo energetico a riposo [W], il quale, a seconda del sesso della persona, può essere ottenuto facendo riferimento alle seguenti relazioni:

  Per gli uomini: $$M_0 = 60\, A_{Du} \tag{3.23}$$

  Per le donne $$M_0 = 55\, A_{Du} \tag{3.24}$$

- HR_0 è la frequenza cardiaca a riposo in condizioni termicamente neutre, la quale può essere ottenuta facendo riferimento al valore della frequenza cardiaca che è stato superato per il 99 % nel periodo di registrazione, a condizione che il soggetto fosse a riposo in un ambiente termicamente neutro (come un ufficio o uno spogliatoio) per almeno 5 minuti durante la registrazione [20];
- RM è l'aumento di frequenza cardiaca per unità di metabolismo energetico, la quale sarà pari a

$$RM = \frac{(HR_{max} - HR_0)}{(MWC - M_0)} \tag{3.25}$$

- HR_{max} è la frequenza cardiaca massima [bpm], la quale sarà pari a

$$HR_{max} = 208 - 0{,}7\ Age \tag{3.26}$$

- MWC è la massima capacità di lavoro [W] e rappresenta la massima quantità di ossigeno V_{O_2} per unità di tempo che una persona consuma in condizioni di massimo sforzo cardiovascolare [53]. Tale quantità può essere stimata mediante un elettrocardiogramma sotto sforzo [53], oppure in funzione delle caratteristiche del soggetto secondo le seguenti relazioni

  <u>*Per gli uomini:*</u>
  $$MWC = (19{,}45 - 0{,}133\ Age)\ W_{bl} \tag{3.27}$$

  <u>*Per le donne*</u>
  $$MWC = (17{,}51 - 0{,}150\ Age)\ W_{bl} \tag{3.28}$$

  dove W_{bl} rappresenta la massa magra della persona, la quale può essere stimata in funzione dell'altezza H_b (in metri) ed il peso W_b (in kg) della persona secondo le seguenti relazioni

  <u>*Per gli uomini:*</u>
  $$W_{bl} = \left(1{,}08 - \frac{W_b}{(80\ H_b^2)}\right) W_b \tag{3.29}$$

  <u>*Per le donne*</u>
  $$W_{bl} = \left(0{,}86 - \frac{W_b}{(107{,}5\ H_b^2)}\right) W_b \tag{3.30}$$

L'accuratezza della stima dell'intensità dell'attività metabolica ottenuta secondo il *Metodo 3.A – Misurazione della frequenza cardiaca in condizioni definite* dipende oltre che dalla precisione delle formule adottate e dall'entità delle componenti della frequenza cardiache non direttamente collegate al carico muscolare dinamico [20], anche dalla precisione della strumentazione utilizzata per la valutazione dei parametri richiesti. Per tale motivo e poiché a differenza dei precedenti metodi d'analisi la probabilità di errore è minore [20;49], l'incertezza nella misurazione del metabolismo energetico sarà nell'ordine del 10 – 15 % [20].

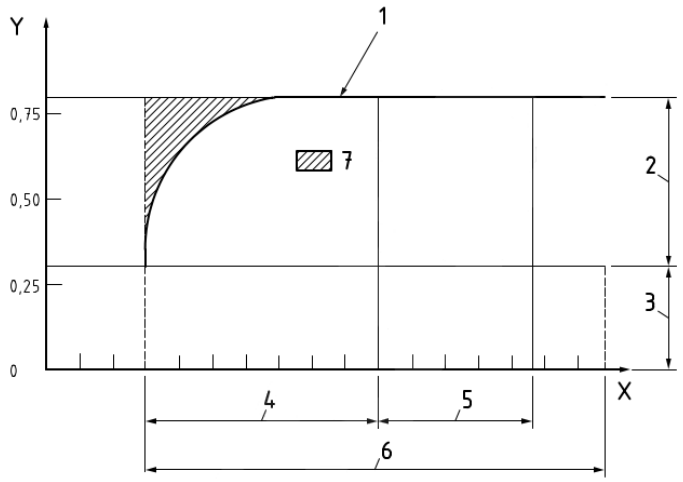
In alternativa alla metodologia precedentemente illustrata, poiché all'aumento del tasso di movimento è associabile un aumento dell'intensità dell'attività metabolica, il *Livello 3 – Analisi* prevede un secondo metodo d'analisi dell'intensità dell'attività metabolica, ovvero il ***Metodo 3.B – Accelerometria*** il quale prevede di posizionare degli accelerometri sul tronco e/o su altri punti del corpo [20]. Tuttavia, a differenza del metodo di valutazione di *Livello 3.A*, la stima dell'intensità dell'attività metabolica ottenuta tramite l'utilizzo degli accelerometri è maggiormente influenzata dalla tipologia di sensore poiché molti alcuni di questi non sono in grado di rilevare alcune tipologie di movimento come quello di manie braccia [20]. Per tale motivo la probabilità di errore e l'incertezza dei valori di metabolismo energetico ottenuti utilizzando il *Metodo 3.B* risultano nettamente superiori rispetto a quelli che si possono ottenere utilizzando il metodo di valutazione di *Livello 3.A* [20].

3.2.2.4 Livello 4 – Valutazione di esperti

Tra i metodi di valutazione dell'intensità dell'attività metabolica proposti dalla UNI EN ISO 8996 [20], le metodologie di analisi di *Livello 4 - Valutazione di esperti* (*Level 4, Expertise*) risultano essere le più precise

avendo queste una probabilità di errore entro i limiti dell'accuratezza della misura ed un'incertezza pari al 5 %, tuttavia data la loro complessità e dal momento che richiedono l'esecuzione di misure molto specifiche, possono essere eseguite soltanto da esperti [20]. Infatti le tecniche di analisi del metabolismo energetico di *Livello 4* comprendono misure di natura calorimetrica, sia dirette che indirette, e non calorimetriche (DLW) [51] e nello specifico sono [20;51]:

- ***Metodo 4A - Misurazione del consumo di ossigeno***, ovvero una tecnica di valutazione calorimetrica indiretta [51] che prevede di valutare il metabolismo energetico a partire dalla misurazione dei volumi di ossigeno O_2 e di anidride carbonica CO_2 scambiati nell'unità di tempo durante lo svolgimento dell'attività [20;51] e che verranno valutati tramite dispositivi quali "sacche di Douglas" [20;54] o appositi campionatori [20]. Tale metodologia di valutazione si basa sull'assunzione che tutto l'ossigeno inalato (V_{O_2}) venga utilizzato durante i processi ossidativi, che tutta l'anidride carbonica prodotta dal corpo (V_{CO_2}) venga recuperata [51] e che l'uguaglianza tra il consumo e la richiesta d'ossigeno (condizione di regime stazionario) venga raggiunta dopo un breve periodo di tempo. Per tali motivi la raccolta dei gas dovrà iniziare dopo circa 5 minuti (periodo preliminare) e dovrà avere una durata di almeno 5-10 minuti (periodo principale) [20];



Asse X: Tempo (in minuti)
Asse Y: Consumo di ossigeno (in $l \cdot min^{-1}$)

1. Richiesta di O_2
2. Aumento del metabolismo energetico dovuto al lavoro
3. Valore basale del metabolismo energetico
4. Periodo preliminare
5. Periodo di misura
6. Periodo di lavoro
7. Deficit di O_2

Figura 3.2.4 Descrizione del periodo di misura del metabolismo energetico [20]

Il *Metodo 4A - Misurazione del consumo di ossigeno* [i] prevede di valutare il metabolismo energetico facendo riferimento al volume di ossigeno consumato e l'equivalente energetico dell'ossigeno mediante la seguente relazione:

$$M = EE\,\dot{V}_{O_2} \tag{3.31}$$

dove:

- EE rappresenta l'equivalente energetico dell'ossigeno in [$W \cdot h \cdot l\ O_2^{-1}$], il quale può essere ottenuto dalla relazione

$$EE = (0{,}23\,RQ + 0{,}77)\,5{,}88 \tag{3.32}$$

- RQ rappresenta il quoziente respiratorio, ovvero il rapporto

$$RQ = \frac{\dot{V}_{CO_2}}{\dot{V}_{O_2}} \tag{3.33}$$

- V_{O_2} e V_{CO_2} rappresentano rispettivamente il consumo orario di ossigeno [l $O_2 \cdot h^{-1}$] e la produzione oraria di anidride carbonica [l $CO_2 \cdot h^{-1}$], i quali possono essere determinati tramite dispositivi quali "sacche di Douglas" [20;54] o facendo riferimento alle formule riportare al *Paragrafo 9.1* della UNI EN ISO 8996 [i]. Tali equazioni consento infatti di valutare V_{O_2} e V_{CO_2} in funzione delle frazioni di O_2 inalata e di CO_2 espirata e di un fattore correttivo *f* che tiene conto della temperatura dell'aria θ, della pressione atmosferica p e della pressione parziale del vapore dell'aria aspirata $p_{a,ex}$ [i].

- ***Metodo 4B - Metodo della doppia marcatura dell'acqua (DLW)***, il quale si basa sull'osservazione che i volumi di ossigeno e di anidride carbonica scambiati durante la respirazione sono in equilibrio di scambio isotopico con l'ossigeno presente nell'acqua contenuta all'interno del corpo [51]. Tale metodologia d'analisi prevede, dopo aver raccolto un campione di urine basali, di far assumere al lavoratore una dose accuratamente pesata di $^2H_2{}^{18}O$ e determinare la velocità di smaltimento del deuterio ^2H (ovvero k_2, eliminato attraverso i fluidi corporei) e del ^{18}O (k_{18}, eliminato come CO_2 e H_2O) [20;55] al fine di valutare la quantità di CO_2 prodotta durante lo svolgimento dell'attività [20;55]: la velocità di produzione di anidride carbonica può essere convertita in termini di dispendio energetico usando i calcoli classici di calorimetria indiretta [20];
- ***Metodo 4C - Calorimetria diretta***, il quale si basa sull'assunzione che tutta l'energia chimica contenuta negli alimenti e liberata durante i processi ossidativi sia convertita soltanto parzialmente in energia utile (energia meccanica) e che più della metà dell'energia potenzialmente disponibile venga dispersa nell'ambiente sotto forma di calore (energia termica) [19;51]. Tale metodologia d'analisi prevede di valutare in un ambiente termicamente neutro il metabolismo energetico a partire dall'analisi dell'energia termica ceduta dal corpo, sia sotto forma di scambi sensibili (conduzioni, convezione ed irraggiamento) che latenti (scambi termici evaporativi) [20] essendo le perdite totali di calore pari al dispendio energetico qualora la persona si trovi in equilibrio termico con l'ambiente [51]. A differenza delle altre metodologie di *Livello 4*, il vantaggio della *Metodo 4C – Calorimetria diretta* è che quest'ultimo si basa sulla misurazione diretta degli scambi termici che avvengono tra la persona e l'ambiente circostante; tuttavia per poter misurare tali scambi termici è necessario utilizzare attrezzature costose, come camere termicamente isolate [20;51] o in alternativa particolari indumenti [20].

3.2.3 Le criticità nella valutazione dell'isolamento termico e del metabolismo energetico

Nonostante le norme tecniche UNI EN ISO 9920 [25] e UNI EN ISO 8996 [20] definiscano le metodologie di analisi che consentono di stimare rispettivamente l'isolamento termico del vestiario e il metabolismo energetico, la valutazione di tali parametri non è esente da errori che dipendono non soltanto dall'esperienza del valutatore, ma anche dalla metodologia d'analisi adottata.

In particolare, per quanto riguarda la valutazione dell'isolamento termico e della resistenza evaporativa del vestiario indossato, nonostante la possibilità di utilizzare le relazioni illustrate al *Paragrafo 3.2.1* e/o i valori riportati negli Allegati [25], la norma UNI EN ISO 9920 [25] raccomanda qualora possibile di valutare questi parametri facendo uso di appositi *manichini termici*[23] [25;50]. Infatti, nonostante i costi elevati e la complessità delle prove sperimentali necessarie ai fini della valutazione [25;50], l'utilizzo di tali attrezzature consente di ottenere dei valori non solo più accurati rispetto a quelli forniti dalla normativa [25], ma anche più attendibili per quanto riguarda le reali caratteristiche, condizioni d'utilizzo e stato di usura del capo d'abbigliamento [50]. Ciò è dovuto al fatto che, attraverso l'uso dei manichini termici è possibile valutare l'isolamento termico del vestiario tenendo conto non soltanto della velocità relativa dell'aria e del movimento della persona, ma anche di una serie di altri fattori che le formule correttive non sono in grado di valutare, ovvero:

- La postura della persona la quale oltre ad influenzare la superficie di scambio termico, può portare anche alla formazione di sacche d'aria, soprattutto all'altezza dei fianchi e delle ginocchia [25] le quali possono portare ad un aumento dell'isolamento termico dello strato d'aria I_a fino al 25 % [25]. In particolare, qualora la persona sia in una posizione seduta l'isolamento termico del vestiario I_{cl} può diminuire fino al 18 % a causa della compressione del vestiario, inoltre sarà necessario tenere conto dell'influenza della tipologia di seduta dal momento che questa aumenta l'isolamento termico complessivo [25];
- La pressione dell'aria poiché la variazione della pressione dell'aria, dovuta ad esempio all'aumento dell'altitudine, è in grado di influenzare non solo gli scambi termici evaporativi tra la persona e l'ambiente circostante, ma anche le perdite di calore a secco che avvengono attraverso il vestiario [25]. In particolare, con l'aumentare dell'altitudine, l'aria diventa più rarefatta riducendo gli scambi termici convettivi ed aumentando di conseguenza l'isolamento termico del vestiario [25];
- La bagnabilità dell'indumento, ossia la capacità dell'indumento di trattenere e di assorbire l'acqua, in quanto la presenza di liquido e/o umidità sullo strato superficiale aumenta la conducibilità del materiale h_c di cui il capo d'abbigliamento è composto portandone ad una riduzione dell'isolamento termico [25];
- Il lavaggio dal momento che, indipendentemente dalla modalità di lavaggio (ad acqua o a secco) e dalla tipologia di tessuto (naturale o sintetico) [56], lavaggi ripetuti e/o non adatti alla tipologia di materiale di cui il capo d'abbigliamento è composto possono portare ad un'alterazione e danneggiamento non solo delle fibre [25;56], ma anche dell'imbottitura [56]. In particolare, la contrazione delle fibre porta ad un aumento dell'isolamento termico [25], tuttavia, come è stato osservato dallo studio condotto da *Sunyoung Kim et al.* [56], la riduzione dello spessore del materiale di riempimento porta ad una significativa diminuzione dell'isolamento termico [25;56], soprattutto nel caso di imbottiture naturali, come piume d'oca o anatra [56]

[23] *Manichini termici:* i manichini termici sono dei particolari manichini dotati di attrezzature in grado di simulare la sudorazione [50] e le perdite di calore secco [25] da parte di un essere umano in determinate condizioni ambientali ed avente indosso il capo d'abbigliamento in esame. Tramite l'ausilio dei manichini termici è possibile valutare l'isolamento termico e la resistenza all'evaporazione di numerosi capi d'abbigliamento e per diverse posizioni del corpo [50] attraverso una serie di prove sperimentali all'interno di una camera climatica [25;50].

Tuttavia, sebbene l'utilizzo dei manichini termici consenta di ottenere una migliore stima dell'isolamento termico e della resistenza termica evaporativa dell'abbigliamento rispetto a quelli forniti dalla normativa, gli elevati costi e la complessità delle prove sperimentali necessarie alla valutazione di tali parametri ne limitano l'uso in un contesto lavorativo. Pertanto, per poter valutare l'isolamento termico e la resistenza evaporativa del vestiario, si predilige fare riferimento alle formule e ai valori riportati agli Allegati della norma UNI EN ISO 9920 [25].

Invece, come discusso al *Paragrafo 3.2.2*, le metodologie d'analisi dell'intensità dell'attività metabolica sono caratterizzate da differenti tipologie di errori e da un divero grado di incertezza a seconda della procedura di analisi adottata. In particolare, come si può osservare nella *Tabella 3.2.1*, l'accuratezza dei risultati ottenuti aumenta all'aumentare della complessità e dei costi del metodo di valutazione adottato. Per tale motivo la normativa UNI EN ISO 8996 precisa che la valutazione del metabolismo energetico dovrà essere condotta facendo uso, per quanto possibile, della metodologia d'analisi più precisa tra quelle disponibili [20].

Livello	**Metodo**	**Precisione**	**Ispezione del luogo di lavoro**
1 Controllo	Classificazione secondo il tipo di attività	Rischio di errore molto elevato Incertezza ± 30 % [19]	Non necessaria
2 Osservazione	Analisi dei tempi e dei movimenti	Rischio di errore elevato Incertezza ± 20 %	Necessaria analisi dei tempi e dei movimenti
3 Analisi	3.A - Misurazione della frequenza cardiaca in condizioni definite	Rischio medio di errore Incertezza da ± 10 a ± 15 %	Necessaria analisi per determinare il periodo di tempo rappresentativo
	3.B - Accelerometria	Rischio di errore elevato	
4 Valutazione di esperti	4.A - Misura del consumo di ossigeno	Errori entro i limiti di precisione della misura o dell'analisi dei tempi e dei movimenti, se rispettate le condizioni dei punti 9.1.1 e 9.1.4 [20] Incertezza ± 5 %	Necessaria analisi dei volumi di ossigeno e anidride carbonica
	4.B - Metodo della doppia marcatura dell'acqua		Non necessaria l'ispezione delle postazioni di lavoro; ma è necessario valutare le attività durante le pause
	4.C - Calorimetria diretta	Errori entro i limiti di precisione della misura o dell'analisi dei tempi e dei movimenti Incertezza ± 5 %	Non necessaria

Tabella 3.2.4: Metodi di valutazione del metabolismo energetico M [19;20;49]

Tuttavia, sebbene nell'ambito della valutazione dell'ergonomia termica i metodi di analisi di *Livello 1 – Controllo* e *Livello 2 - Analisi* siano quelli più comunemente utilizzati data la loro semplicità di applicazione, l'incertezza dei valori ottenibili risulta modesta poiché questi sono ampiamente influenzati dall'esperienza del valutatore [20]. Inoltre, a differenza degli altri due livelli di analisi, le prime due metodologie non consentono di tenere conto adeguatamente delle caratteristiche personali e fisiologiche che influenzano il metabolismo energetico, come l'età, il peso, l'altezza, il sesso, e la condizione di salute [20;54]. Per tali motivi e poiché dal punto di vista fisiologico la frequenza cardiaca ed il consumo di ossigeno sono i due parametri che consentono di rappresentare al meglio l'intensità dell'attività metabolica [54], il *Livello 3 – Analisi* ed il *Livello 4 – Valutazione di esperti* sono tra i metodi di valutazione che, nonostante la difficoltà di applicazione in un contesto lavorativo, sono in grado di fornire valori di metabolismo energetico più precisi [19;20;54]. Tuttavia, nonostante la maggior precisione nella stima del dispendio energetico, i metodi di valutazione del *Livello 4* vengono utilizzati solitamente per finalità di ricerca o di studio essendo difficilmente applicabili in un contesto lavorativo [19;54] a causa non solo dei costi delle analisi e delle attrezzature richieste (camere climatiche, analisi di laboratorio, etc.) [20;54], ma anche della loro possibile interferenza con il compito da misurare [54]. Al contrario, grazie allo sviluppo negli ultimi decenni dei cardiofrequenzimetri e di dispositivi indossabili analoghi in grado di monitorare la frequenza cardiaca e/o il movimento sempre più precisi e facilmente indossabili, le metodologie di analisi di *Livello 3* consentono di stimare l'intensità dell'attività metabolica senza interferire con lo svolgimento dell'attività lavorativa [54].

Pertanto, al netto delle precedenti considerazioni, tra le tecniche di analisi proposte dalla norma UNI EN ISO 8996, quella descritta al *Livello 3.A – Analisi - Misurazione della frequenza cardiaca in condizioni definite* risulta essere quella in grado di fornire la migliore stima del metabolismo energetico in un contesto lavorativo in cui le condizioni di lavoro siano totalmente dinamiche ed il contributo dei carichi muscolari statici, mentali e respiratori siano trascurabili.

CAPITOLO 4

ANALISI DEL RISCHIO MICROCLIMATICO

Applicazione delle metodologie di analisi del rischio in un ambiente moderabile e in un ambiente severo caldo indoor

4.1 PRIMO CASO STUDIO: *Ambiente moderabile - Ufficio*

Nel primo caso studio viene condotta un'analisi del rischio microclimatico negli uffici di un'azienda che si occupa di consulenza in materia di salute e sicurezza sul lavoro. Data l'assenza di vincoli legati ai processi produttivi in grado di pregiudicare il raggiungimento delle condizioni di comfort [12] e data la possibilità da parte degli occupanti di modificare a piacimento le caratteristiche microclimatiche presenti, ad esempio mediante la apertura/chiusura delle finestre o la variazione delle impostazioni del sistema di climatizzazione, gli ambienti termici analizzati vengono classificati come moderabili.

Di conseguenza, poiché in tale tipologia di ambienti l'obiettivo da perseguire è quello del raggiungimento delle condizioni di comfort termico e data l'assenza di sorgenti di rischio che possono portare a condizioni di stress termico, verrà valutato il comfort/discomfort termico globale provata dai lavoratori attraverso la stima degli indici PMV e PPD secondo la procedura d'analisi introdotta dalla norma UNI EN ISO 7730 [18]. In caso di superamento dei valori limite del metodo PMV/PPD le aree d'ufficio analizzate verrebbero classificate come ambienti moderabili non moderati e poiché in tale tipologia di ambienti le condizioni microclimatiche possono essere tali da costituire un rischio per la salute dei lavoratori [12;21], verrà valutato anche lo stress termico provato dai lavoratori secondi i metodi d'analisi introdotti dalle norme UNI EN ISO 7243 [35], UNI EN ISO 7933 [36] ed UNI EN ISO 11079 [38].

4.1.1 Misure e interpretazione dei dati ottenuti

A seguito dell'analisi degli ambienti di lavoro, la valutazione delle condizioni di comfort/discomfort si è concentrata sulle aree lavorative che, dal punto di vista delle caratteristiche microclimatiche, della tipologia di mansioni svolte e dell'abbigliamento indossato, sono risultate essere le più rappresentative [12;43] ovvero:

1. L' *Ufficio al piano terra*
2. L' *Ufficio al primo piano*
3. La *Reception*
4. La *Sala riunioni*

Per le aree e postazioni operative sopraindicate sono stati determinati i parametri ambientali necessari alla valutazione degli indici microclimatici attraverso l'utilizzo di una centralina microclimatica DELTA OHM. Considero i tempi di risposte delle sonde utilizzate ed essendo tali ambienti in regime non stazionario, per tenere conto della variabilità temporale si ritiene che una durata della misura di almeno 3 minuti, al netto del tempo di risposta della sonda a maggior inerzia termica (ossia il globotermometro avente questo un T_{95} = 15 minuti), sia sufficiente a fornire una descrizione adeguata delle variabili fisiche [12]. Nelle tabelle seguenti vengono riportati i valori relativi ai parametri ambientali di temperatura, umidità, velocità e pressione dell'aria ottenuti per tali aree.

Dati Ambientali Acquisiti - ID Misura 1: UFFICIO AL PIANO TERRA				
Indicatore	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std**
Temp. bulbo umido Tw [°C]	20,9	20,7	20,8	0,1
Temp. globotermometro Tg [°C]	25,1	25	25,1	0,0
Temp. aria Ta [°C]	25,3	25,2	25,2	0,0
Umidità relativa RH [%]	57,7	57,5	57,6	0,1
Velocità dell'aria [m/s]	0,01	0,00	0,00	0,00
Pressione atmosferica Pr [hPa]	1011,0	1011,0	1011,0	0,0
Temperatura radiante [°C]	25,1	25,0	25,1	0,1

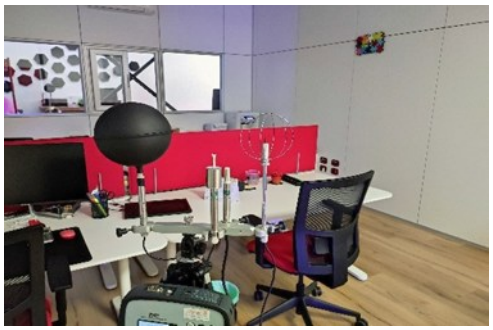


Tabella 4.1.1 Parametri ambientali acquisiti e calcolati necessari ai fini della valutazione delle condizioni di comfort/discomfort e dello stress termico provato dai lavoratori presso l'UFFICIO AL PIANO TERRA

Dati Ambientali Acquisiti - ID Misura 2:				
Indicatore	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std**
Temp. bulbo umido Tw [°C]	22,8	22,6	22,7	0,1
Temp. globotermometro Tg [°C]	25,8	25,7	25,7	0,0
Temp. aria Ta [°C]	25,8	25,7	25,8	0,0
Umidità relativa RH [%]	57,9	57,3	57,6	0,2
Velocità dell'aria [m/s]	0,05	0,00	0,02	0,0
Pressione atmosferica Pr [hPa]	1012,2	1012,1	1012,2	0,0
Temperatura radiante [°C]	25,8	25,7	25,7	0,0

Tabella 4.1.2 Parametri ambientali acquisiti e calcolati necessari ai fini della valutazione delle condizioni di comfort/discomfort e dello stress termico provato dai lavoratori presso l'UFFICIO AL PRIMO PIANO

Dati Ambientali Acquisiti - ID Misura 3: RECEPTION				
Indicatore	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std**
Temp. bulbo umido Tw [°C]	20,9	20,3	20,4	0,2
Temp. globotermometro Tg [°C]	25,2	25,1	25,1	0,0
Temp. aria Ta [°C]	25,3	24,9	24,9	0,1
Umidità relativa RH [%]	59,2	57,7	59,0	0,4
Velocità dell'aria [m/s]	0,08	0,00	0,06	0,0
Pressione atmosferica Pr [hPa]	1011,9	1011,0	1011,8	0,2
Temperatura radiante [°C]	25,3	25,1	25,2	0,1

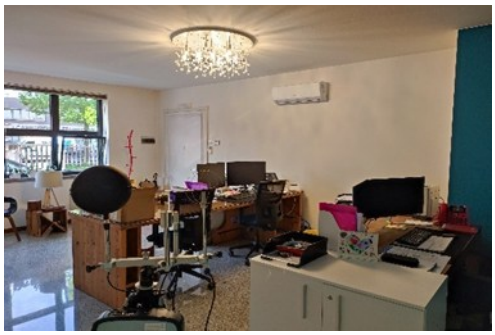


Tabella 4.1.3 Parametri ambientali acquisiti e calcolati necessari ai fini della valutazione delle condizioni di comfort/discomfort e dello stress termico provato dai lavoratori presso la RECEPTION

Dati Ambientali Acquisiti - ID Misura 4: SALA RIUNIONI				
Indicatore	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std**
Temp. bulbo umido Tw [°C]	22,2	22,1	22,2	0,0
Temp. globotermometro Tg [°C]	25,1	25	25,0	0,0
Temp. aria Ta [°C]	25,1	25,1	25,1	0,0
Umidità relativa RH [%]	57,3	57,0	57,1	0,1
Velocità dell'aria [m/s]	0,10	0,00	0,03	0,0
Pressione atmosferica Pr [hPa]	1011,8	1011,8	1011,8	0,0
Temperatura radiante [°C]	25,1	24,9	25,0	0,1

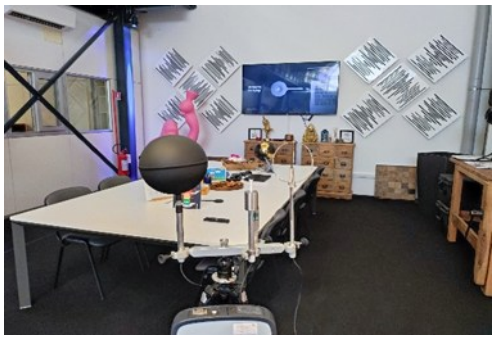


Tabella 4.1.4 Parametri ambientali acquisiti e calcolati necessari ai fini della valutazione delle condizioni di comfort/discomfort e dello stress termico provato dai lavoratori presso la SALA RIUNIONI

Successivamente per il personale impiegato in tali aree sono stati definiti i parametri soggettivi: a seguito dell'osservazione dalla tipologia di mansioni svolte e del vestiario indossato, per la valutazione si è scelto di considerare un unico parametro soggetto ovvero:

- Parametro soggetto 1: Impiegato d'ufficio

Per la valutazione dell'isolamento termico del vestiario I_{cl} è stato possibile fare riferimento alle tabelle dell'*Allegato A* della norma UNI EN ISO 9920 [25] poiché negli ambienti di lavoro oggetto dell'indagine l'abbigliamento tipicamente indossato è composto da una combinazione di vestiti presente in tali tabelle, ovvero da biancheria intima, camicia, pantaloni leggeri, calzini e scarpe. Pertanto, facendo riferimento alla *Tabella A.1* [25], l'isolamento termico del vestiario indossato è risultato essere pari a

$$I_{cl} = 0{,}6\ clo \tag{4.1}$$

Invece, per quanto riguarda la stima dell'intensità dell'attività metabolica è stato adottato il metodo di valutazione di *Livello 1 – Controllo* [20], ma anziché utilizzare i valori riportati nella *Tabella A.1* della norma UNI EN ISO 8996 [20] si è deciso di fare riferimento a quelli riportati nell'*Allegato B* della norma UNI EN ISO 7730 [18] essendo qui definiti i valori di metabolismo energetico di alcune attività sedentarie, tra cui quella d'ufficio. Pertanto, il valore di metabolismo energetico riferito alla mansione d'ufficio adottato ai fini della valutazione è risultato essere pari a

$$M = 70\ \frac{W}{m^2} \tag{4.1}$$

Di seguito viene riportata una tabella riepilogativa dei parametri di isolamento termico e metabolismo energetico adottati per lo svolgimento dell'analisi degli indici di comfort/discomfort e di stress termico.

Parametro Soggetto	**Descrizione**	**Vestiario**	**Isolamento termico dell'abbigliamento indossato [clo]**	**Intensità dell'attività metabolica [W/m^2]**
1	Impiegato d'ufficio	Biancheria intima, camicia, pantaloni leggeri, calzini e scarpe	0,6 clo	70 W/m^2

Tabella 4.1.5 Tabella di riepilogo del vestiario indossato dal Parametro Soggetto Impiegato d'ufficio e dei relativi valori di isolamento I_{cl} [clo] e metabolismo energetico [met]

A questo punto, dopo aver determinato i parametri ambientali e i parametri soggettivi, è stato possibile valutare gli indici di comfort/discomfort termico globale facendo riferimento alla procedura di analisi proposta nella norma UNI EN ISO 7730 [18] e le cui formule principali sono state illustrate nel *Capitolo 2*. Tali formule sono state implementate in un file di calcolo Excel in modo da poter valutare gli indici PMV/PPD per ciascuna area e postazione operativa in funzione dei parametri ambientali e soggettivi precedentemente ottenuti. Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti per ciascuna area e postazione operativa in funzione dei parametri ambientali e soggettivi ed i grafici dell'andamento temporale dell'indice PMV mentre nell'*Allegato 1* vengono riportate le singole schede di calcolo

ID MISURA	DESCRIZIONE AMBIENTE	PARAMETRO SOGGETTO	Indice PMV [-]	Indice PPD [%]
1	UFFICIO AL PIANO TERRA	Parametro Soggetto 1	0,33	7,2
2	UFFICIO AL PRIMO PIANO	Parametro Soggetto 1	0,50	10,3
3	RECEPTION	Parametro Soggetto 1	0,32	7,1
4	SALA RIUNIONI	Parametro Soggetto 1	0,30	6,9

Tabella 4.1.6 Tabella di riepilogo degli indici di comfort/discomfort termico PMV e PPD relativi agli ambienti termici ed ai parametri soggettivi in esame.

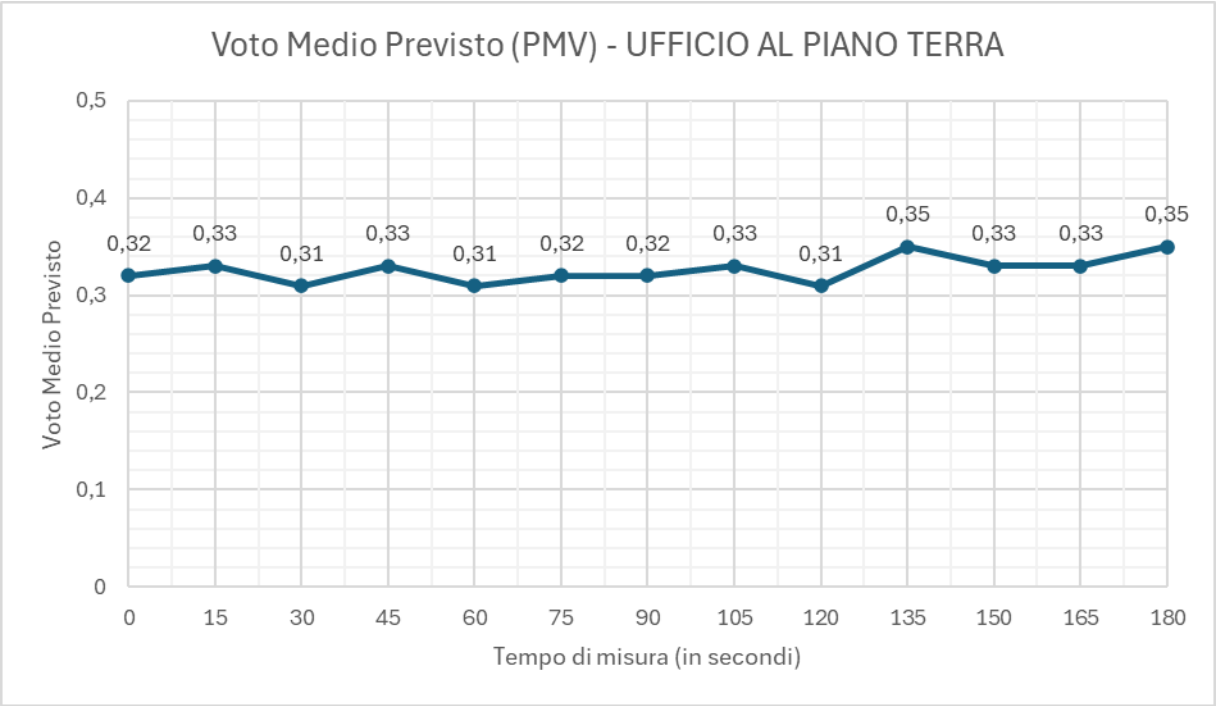


Grafico 4.1.1 Andamento temporale del Voto Medio Previsto (PMV) presso l'UFFICIO AL PIANO TERRA

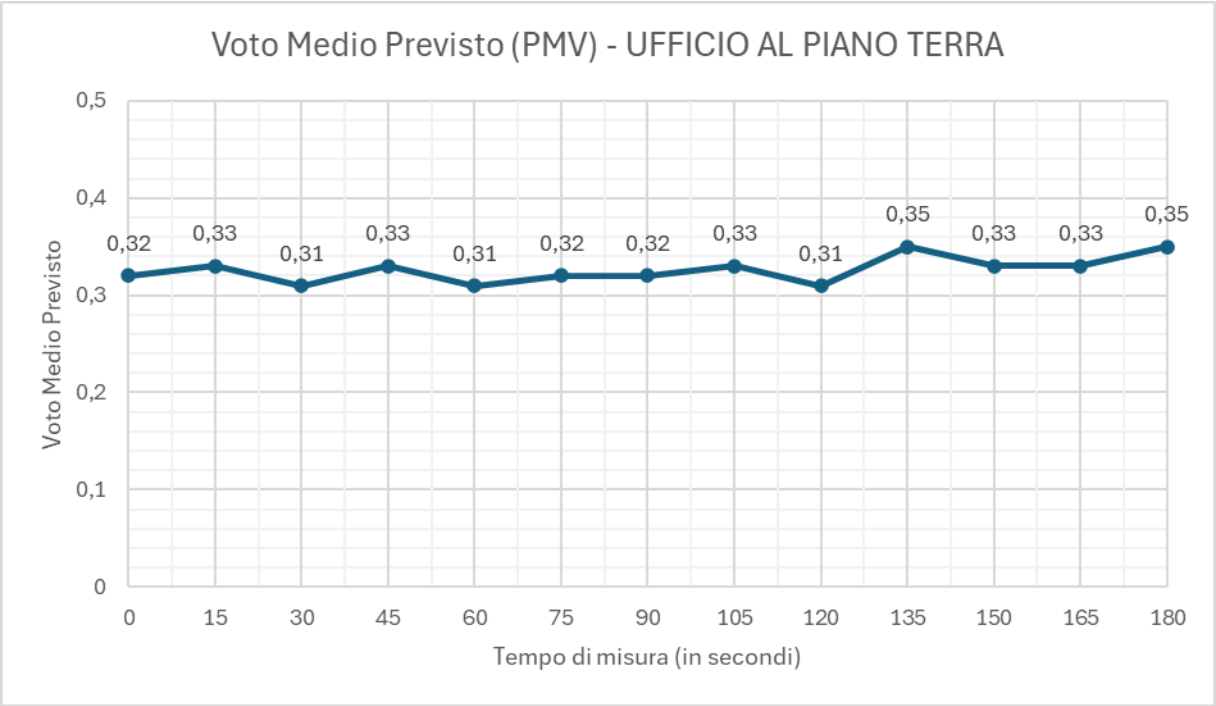


Grafico 4.1.2 Andamento temporale del Voto Medio Previsto (PMV) presso l'UFFICIO AL PRIMO PIANO

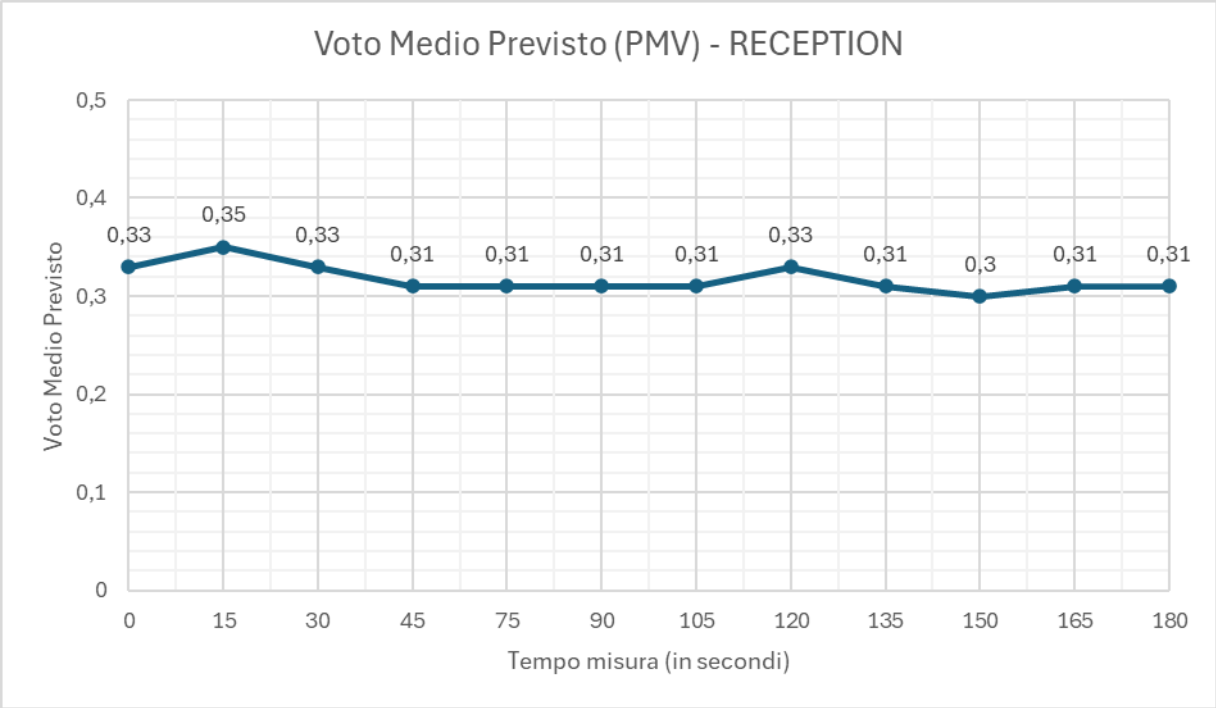


Grafico 4.1.3 Andamento temporale del Voto Medio Previsto (PMV) presso la RECEPTION

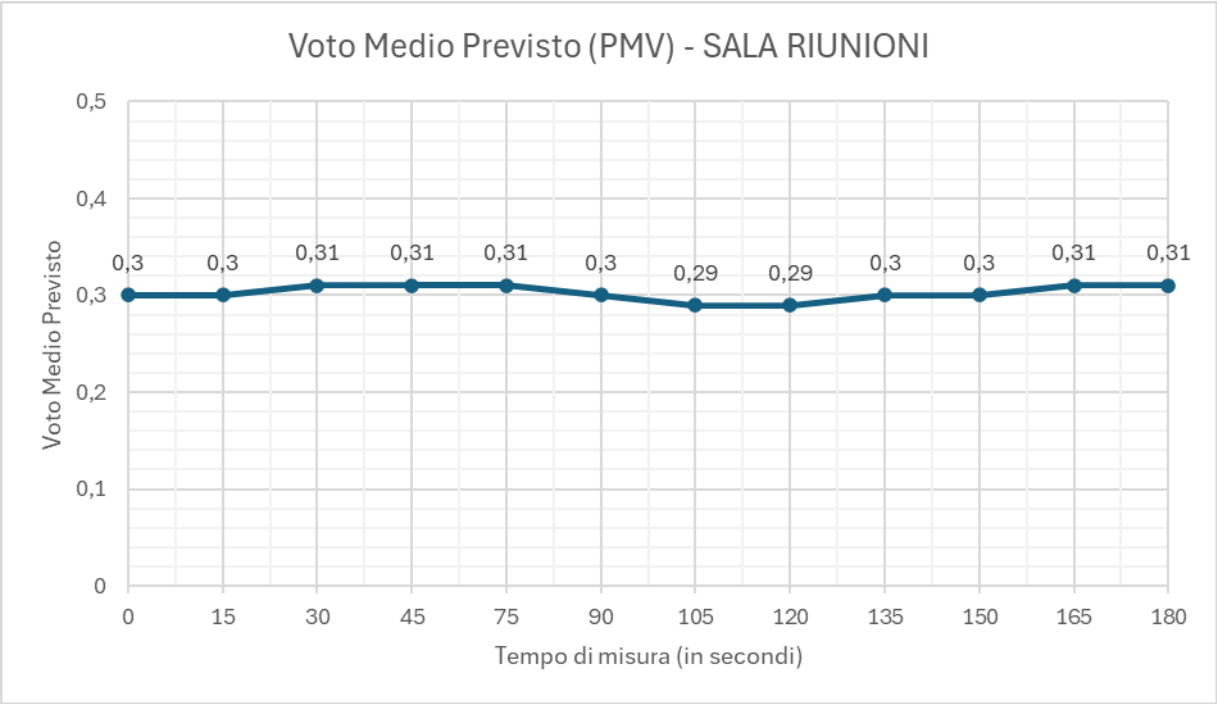


Grafico 4.1.4 Andamento temporale del Voto Medio Previsto (PMV) presso la SALA RIUNIONI

Dai valori precedentemente ottenuti si può concludere che nelle aree d'ufficio oggetto dell'indagine del primo caso studio la sensazione termica globale provata dai lavoratori sia prossima alla neutralità termica e che i valori limite del metodo di valutazione del comfort/discomfort termico [18] riportarti nella *Tabella 2.2.3* non vengono superati. Pertanto le aree oggetto dell'analisi del primo caso studio sono classificabili come ambienti moderabili moderati e poiché in tale tipologia di ambienti non sono presenti sorgenti e/o condizioni tali da rappresentare un rischio per la salute dei lavoratori, non sarà necessario procedere all'analisi degli indici di stress termico.

4.2 SECONDO CASO STUDIO*: Ambiente severo caldo indoor – Vetreria Industriale*

A differenza del primo caso studio, nel secondo caso studio vengono analizzate le condizioni di comfort/discomfort e di stress termico provata dai lavorati presso un'azienda specializzata nella produzione di articoli in vetro pressato tra cui oblò per lavatrici ed altri elettrodomestici. Per la realizzazione di tali prodotti, il processo produttivo prevede la fusione delle materie prime a temperature molto elevate (circa 1500 – 1550 °C) e successive fasi di controllo, pulizia e raffreddamento necessarie all'ottenimento del prodotto finito. Nelle vetrerie industriali come quella oggetto del caso studio, le principali aree e postazioni operative in cui avvengono i processi di produzione del vetro sono:

- Le ***Aree dei forni di fusione*** nelle quali si ottiene il vetro a seguito dei processi fusioni delle materie prime, principalmente sabbia silicea, carbonato di sodio e carbonato di calcio. Tali forni sono progettati per ridurre al minimo la dispersione di calore (forni coibentati) e dal momento che il processo di pesata, miscelazione e caricamento delle materie prime è interamente automatizzato il livello di rischio microclimatico è da ritenersi trascurabile essendo in tali aree la presenza di personale occasionale;
- L' ***Area di Scovolatura***, ovvero l'area in cui avvengono le operazioni di controllo e di pulizia necessarie alla rimozione di eventuali impurità e/o residui della lavorazione dalla superficie interna degli stampi tramite l'utilizzo di uno scovolo, ossia un particolare tipo di spazzola;
- La ***Postazione di Take Out***, ovvero la postazione presso l'*Area di Scovolatura* in cui avviene l'estrazione manuale del semilavorato dagli stampi qualora vengano rilevati difetti nel prodotto;
- L' ***Area di Collaudo***, ovvero l'area nella quale il prodotto finito vengono fatte le verifiche di collaudo del prodotto finito.

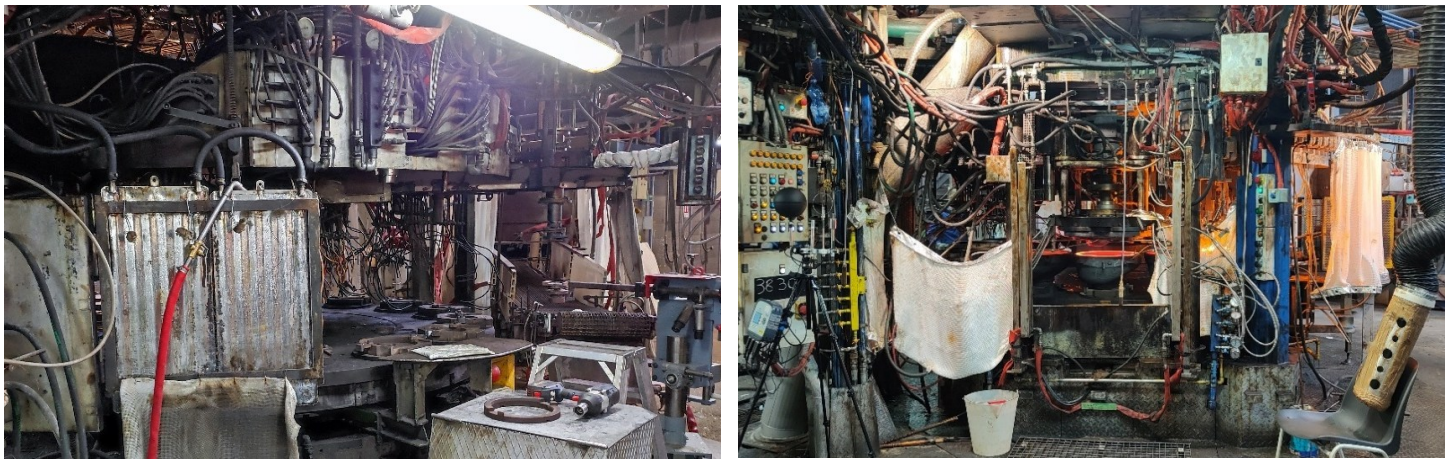


Figura 4.2.1 Postazioni operative presso l'AREA DI SCOVOLATURA con linea produttiva in stato di arresto (a sinistra) e in funzione (a destra)

Dall' analisi della tipologia di azienda e dei processi produttivi, gli ambienti termici della vetreria in esame possono essere classificati come ambienti severi caldi e di conseguenza l'obiettivo da perseguire non sarà il raggiungimento della condizione di comfort termico bensì la salvaguardia della salute e della sicurezza dei lavoratori [5;12;16;21]. Pertanto oltre alla valutazione del comfort/discomfort termico globale tramite l'analisi degli indici PMV e PPD [18] al fine di verificare che non siano presenti delle condizioni di rischio sarà

necessario valutare anche lo stress termico provato dai lavoratori attraverso l'analisi dell'indice WBGT [35], della perdita totale di liquidi e della temperatura rettale raggiunta al termine dell'esposizione oltre ad il tempo limite d'esposizione [36], secondo i metodo d'analisi introdotti dalle normative UNI EN ISO 7243 [35] e UNI EN ISO 7933 [36].

4.2.1 Misure e interpretazione dei dati ottenuti

A seguito dell'analisi del ciclo produttivo e degli ambienti di lavoro, la valutazione delle condizioni di comfort/discomfort e dello stress termico provata dai lavoratori è stata eseguita presso le aree caratterizzate da presenza continuativa di personale e che, dal punto di vista delle caratteristiche microclimatiche, della tipologia di mansioni svolte e dell'abbigliamento indossato, sono risultate essere le più rappresentative [43;12] ovvero:

1. L' *Area di Scovolatura;*
2. L' *Area di Scovolatura – Postazione di Take Out*
3. L' *Area di Collaudo.*

Per le aree operative sopraindicate sono stati determinati i parametri ambientali necessari alla valutazione degli indici microclimatici attraverso l'utilizzo di una centralina microclimatica DELTA OHM. Considerando i tempi di risposte delle sonde utilizzate ed essendo tali ambienti in regime non stazionario, per tenere conto della variabilità temporale si ritiene che una durata della misura di almeno 3 minuti, al netto del tempo di risposta della sonda a maggior inerzia termica (ossia il globotermometro, T_{95} = 15 minuti), sia sufficiente a fornire una descrizione adeguata delle variabili fisiche [12]. Nelle tabelle seguenti vengono riportati i valori relativi ai parametri ambientali di temperatura, umidità, velocità e pressione dell'aria ottenuti per tali aree.

Dati Ambientali Acquisiti - ID Misura 1: AREA DI SCOVOLATURA				
Indicatore	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std**
Temp. bulbo umido Tw [°C]	27,0	26,5	26,7	0,1
Temp. globotermometro Tg [°C]	47,4	47,1	47,2	0,1
Temp. aria Ta [°C]	42,4	42,0	42,1	0,1
Umidità relativa RH [%]	32,4	30,9	31,8	0,4
Velocità dell'aria [m/s]	1,58	0,62	1,05	0,3
Pressione atmosferica Pr [hPa]	1000,3	1000,2	1000,3	0,0
Temperatura radiante [°C]	59,6	54,1	56,7	1,6

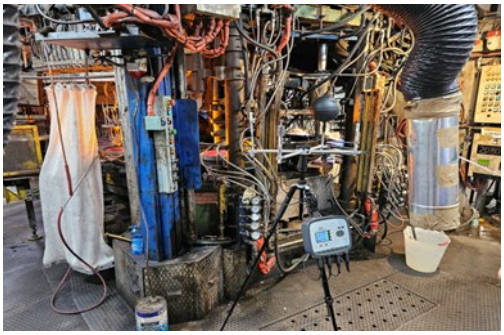


Tabella 4.2.1 Parametri ambientali acquisiti e calcolati necessari ai fini della valutazione delle condizioni di comfort/discomfort e dello stress termico provato dai lavoratori presso l'AREA DI SCOVOLATURA

Dati Ambientali Acquisiti - ID Misura 2: POSTAZIONE DI TAKE OUT				
Indicatore	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std**
Temp. bulbo umido Tw [°C]	29,5	28,4	28,9	0,3
Temp. globotermometro Tg [°C]	50,5	50,1	50,3	0,1
Temp. aria Ta [°C]	46,6	46,0	46,1	0,2
Umidità relativa RH [%]	26,2	24,9	25,7	0,3
Velocità dell'aria [m/s]	1,86	0,72	1,34	0,3
Pressione atmosferica Pr [hPa]	1000,0	1000,0	1000,0	0,0
Temperatura radiante [°C]	61,2	56,3	58,9	1,3

Tabella 4.2.2 Parametri ambientali acquisiti e calcolati necessari ai fini della valutazione delle condizioni di comfort/discomfort e dello stress termico provato dai lavoratori presso la POSTAZIONE DI TAKE OUT

Dati Ambientali Acquisiti - ID Misura 3: AREA DI COLLAUDO				
Indicatore	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std**
Temp. bulbo umido Tw [°C]	24,6	24,5	24,5	0,0
Temp. globotermometro Tg [°C]	34,0	33,8	33,9	0,1
Temp. aria Ta [°C]	33,3	33,1	33,2	0,1
Umidità relativa RH [%]	48,9	48,2	48,6	0,2
Velocità dell'aria [m/s]	1,11	0,52	0,73	0,2
Pressione atmosferica Pr [hPa]	999,2	999,2	999,2	0,0
Temperatura radiante [°C]	35,6	34,7	35,1	0,3

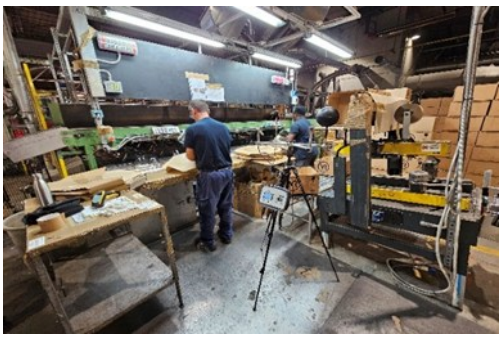


Tabella 4.2.3 Parametri ambientali acquisiti e calcolati necessari ai fini della valutazione delle condizioni di comfort/discomfort e dello stress termico provato dai lavoratori presso l'AREA DI COLLAUDO

Successivamente per il personale impiegato in tali aree sono stati definiti i parametri soggettivi: a seguito dell'osservazione dalla tipologia di mansioni svolte e del vestiario indossato, i lavoratori sono stati suddivisi in due parametri soggetto distinti, ovvero:

- Parametro soggetto 1: Addetto alla produzione
- Parametro soggetto 2: Collaudatore

In particolare, per la valutazione dell'isolamento termico del vestiario I_{cl} non è stato possibile fare riferimento ai valori riportati all' *Allegato A* della norma UNI EN ISO 9920 [25] a causa della particolare combinazione di vestiario indossato dagli *Addetti alla produzione* e si è quindi deciso di determinare l'isolamento termico dell'abbigliamento a partire da quello dei singoli capi d'abbigliamento $I_{cl,u}$ riportati nelle *Tabelle B.1 e B.2* [25] ed utilizzando la relazione (3.10) riportata al *Paragrafo 3.2*. In tali tabelle tuttavia non risulta disponibile l'isolamento termico della *Camicia ignifuga* (maglietta a maniche lunghe in tessuto al 79% cotone, 20% poliestere ed 1% fibra conduttiva) indossata dagli *Addetti alla produzione* e pertanto è stato considerato l'isolamento termico del capo d'abbigliamento per caratteristiche più simile tra quelli disponibili, ovvero la *Camicia a maniche lunghe* in tessuto al 80% cotone e 20% poliestere. Nella tabella seguente vengono riportati i riportati i valori di $I_{cl,u}$ dei singoli capi d'abbigliamento.

Singoli capi d'abbigliamento indossati	**Isolamento termico del singolo capo d'abbigliamento I_{clu} [clo]**
Biancheria intima	0,04
Maglietta a maniche corte	0,25
Pantaloni dritti larghi	0,26
Calze	0,05
Scarpe antinfortunistiche	0,05
Guanti anticalore	0,08
Camicia ignifuga*	0,34

Tabella 4.2.4 Valori di isolamento termico dei singoli capi d'abbigliamento $I_{cl,u}$ [25]

Dunque facendo riferimento ai valori di isolamento termico dei singoli capi d'abbigliamento $I_{cl,u}$ disponibili, l'isolamento termico dell'abbigliamento indossato dai due parametri soggetti risulta essere pari a

$$I_{cl_1} = 0{,}161 + 0{,}835 \sum I_{clu} = 0{,}161 + 0{,}835 \times (0{,}04 + 0{,}25 + 0{,}26 + 0{,}05 + 0{,}08 + 0{,}34) = 1{,}05\ clo \quad (4.3)$$

$$I_{cl_2} = 0{,}161 + 0{,}835 \sum I_{clu} = 0{,}161 + 0{,}835 \times (0{,}04 + 0{,}25 + 0{,}26 + 0{,}05) = 0{,}7\ clo \quad (4.4)$$

Invece, per quanto riguarda la stima dell'intensità dell'attività metabolica è stato adottato il metodo di valutazione di *Livello 1 – Controllo* [20] e dall'osservazione delle mansioni svolte si è potuto constatare come la maggior parte delle attività vengano svolte in piedi e che queste richiedessero l'ausilio di utensili di piccole e medie dimensioni da banco e non per l'ispezione ed il controllo dei semiprodotti e dei prodotti finiti. Dunque essendo le attività svolte assimilabili ad attività leggere in piedi e facendo riferimento alla *Tabella A.1* della norma UNI EN ISO 8996 [20], la classe metabolica corrispondente alla tipologia di mansioni svolte è quella di *Livello 1 – Basso tasso metabolico* il cui range di metabolismo energetico è compreso tra i 125 e i 235 W. Facendo quindi riferimento ad una persona standard il valore dell'area di superficie corporea è pari a 1,8 m^2 [36], il metabolismo energetico medio corrispondente a tale classe metabolica sarà pari a

$$M_{medio} = \frac{(125 + 235)}{2}\ W \times \frac{1}{1{,}8\ m^2} = 100\ \frac{W}{m^2} \quad (4.5)$$

Di seguito viene riportata una tabella riepilogativa dei parametri di isolamento termico e metabolismo energetico adottati per lo svolgimento dell'analisi degli indici di comfort/discomfort e di stress termico.

Parametro Soggetto	Descrizione	Vestiario	Isolamento termico dell'abbigliamento indossato [clo]	Intensità dell'attività metabolica [W/m^2]
1	Addetto alla produzione	Biancheria intima, maglietta a maniche corte, pantaloni dritti larghi, calze, scarpe, guanti anticalore, camicia ignifuga	1,05 clo	100 W/m^2
2	Collaudatore	Biancheria intima, maglietta a maniche corte, pantaloni dritti larghi, calze, scarpe	0,7 clo	100 W/m^2

Tabella 4.2.5 Tabella di riepilogo del vestiario indossato dai due parametri soggetto Addetto alla produzione e Collaudatore e dei relativi valori di isolamento I_{cl} [clo] e metabolismo energetico [met]

A questo punto, dopo aver determinato i parametri ambientali e soggettivi, è stato possibile valutare gli indici di comfort/discomfort termico globale facendo riferimento alla procedura analitica proposta dalla norma UNI EN ISO 7730 [18] le cui formule principali sono state illustrate nel *Capitolo 2*. Tali formule sono state implementate in un file di calcolo Excel in modo da valutare gli indici PMV/PPD per ciascuna area operativa in funzione dei parametri ambientali e soggettivi precedentemente ottenuti. Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti per ciascuna area operativa in funzione dei parametri ambientali e soggettivi ed i grafici

dell'andamento temporale dell'indice PMV mentre nell'*Allegato 2* vengono riportate le singole schede di calcolo

ID MISURA	DESCRIZIONE AMBIENTE	PARAMETRO SOGGETTO	Indice PMV	Indice PPD
1	AREA DI SCOVOLATURA	Parametro Soggetto 1	4,93	100,0
2	POSTAZIONE DI TAKE OUT	Parametro Soggetto 1	5,56	100,0
3	AREA DI COLLAUDO	Parametro Soggetto 2	2,69	96,6

Tabella 4.2.6 Tabella di riepilogo degli indici di comfort/discomfort termico PMV e PPD relativi agli ambienti termici ed ai parametri soggettivi in esame.

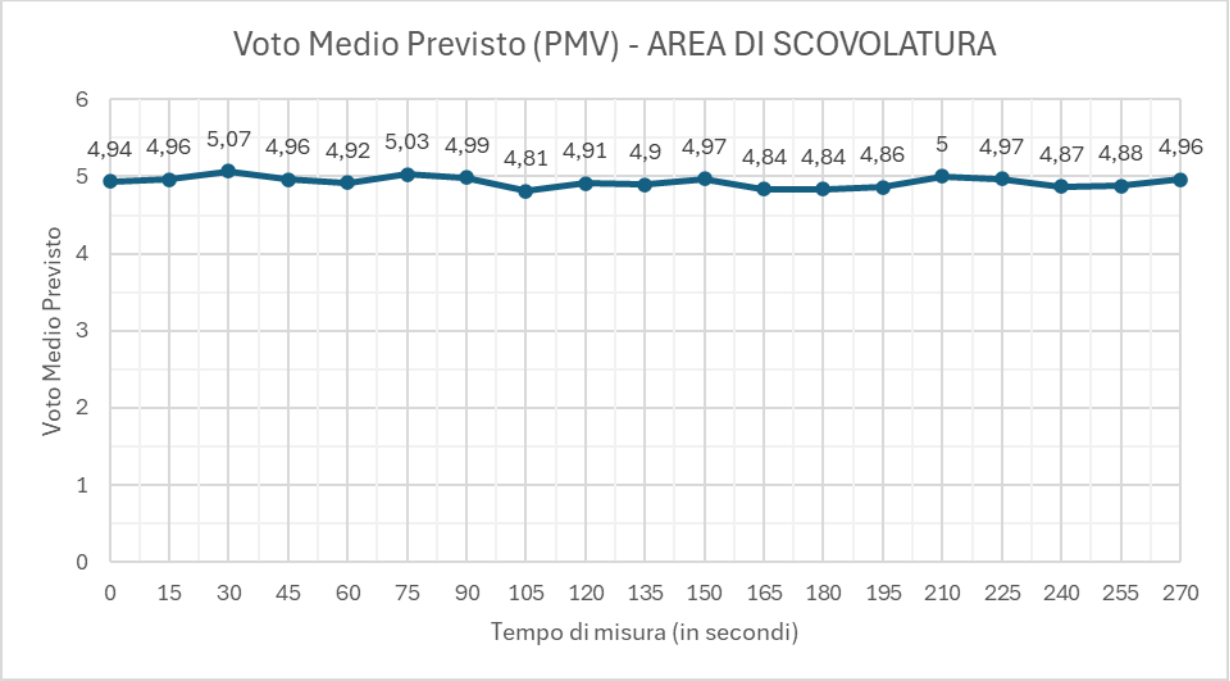


Grafico 4.2.1 Andamento temporale del Voto Medio Previsto (PMV) presso l'AREA DI SCOVOLATURA

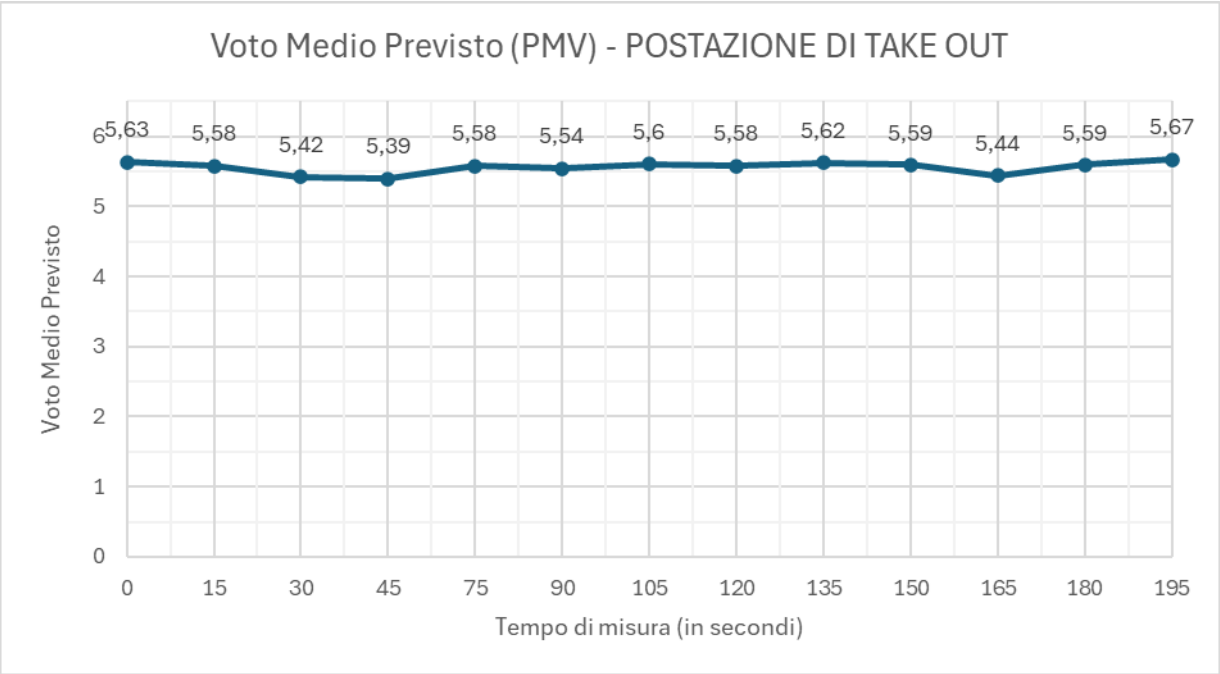


Grafico 4.2.2 Andamento temporale del Voto Medio Previsto (PMV) presso l'AREA DI TAKE OUT

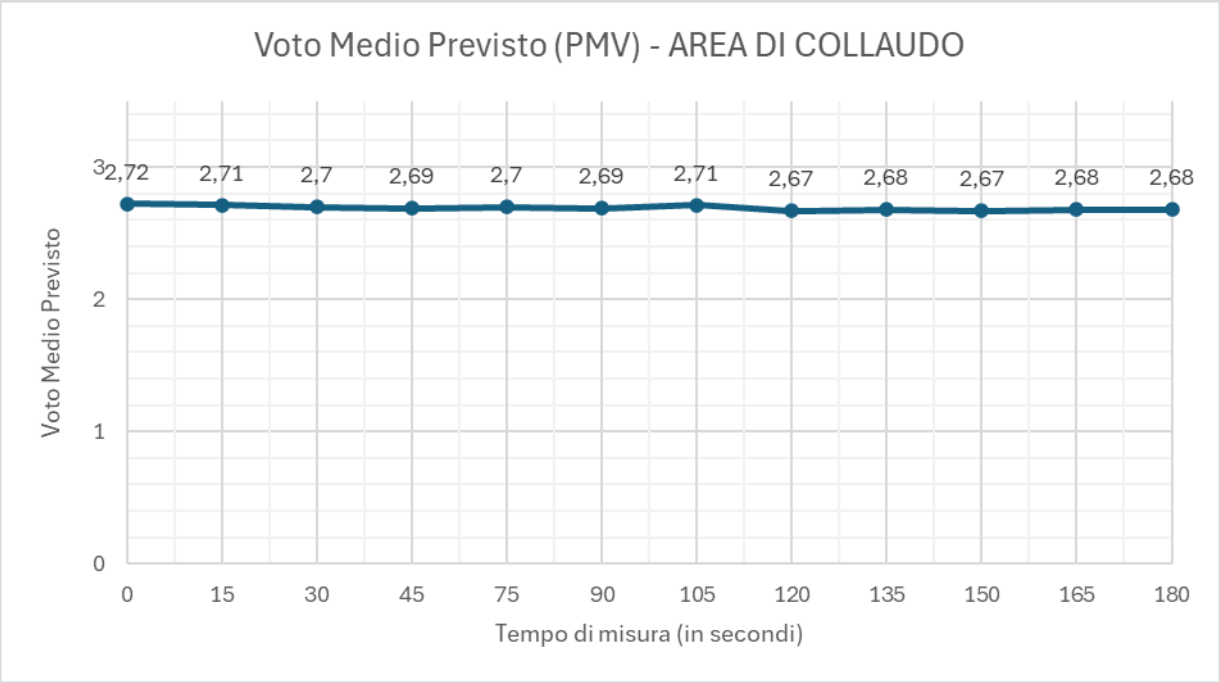


Grafico 4.2.3 Andamento temporale del Voto Medio Previsto (PMV) presso l'AREA DI COLLAUDO

Dal momento che la tipologia di azienda ed i relativi processi produttivi rendono gli ambienti termici in esame classificabili come ambienti severi caldi e poiché gli estremi degli intervalli di applicabilità del metodo d'analisi del comfort/discomfort termico globale riportati nella *Tabella 2.2.3* vengono superati, è stato necessario valutare anche lo stress termico provato dai lavoratori. Pertanto, dopo aver implementato in un file di calcolo Excel le metodologie di analisi introdotte dalle norme UNI EN ISO 7243 [35] e UNI EN ISO 7933 [36] è stato possibile determinare gli indici WBGT, la perdita totale di liquidi e la temperatura rettale al termine dell'esposizione oltre al massimo tempo d'esposizione all'ambiente severo caldo. Di seguito vengono illustrati

i risultati ottenuti per ciascuna area operativa in funzione dei parametri ambientali e soggettivi nell'*Allegato 2* vengono riportate le singole schede di calcolo

ID MISURA	DESCRIZIONE AMBIENTE	WBGT eff [°C]	WBGT limite acclimatato [°C]	Water Loss al termine dell'esposizione [g]	Temperatura rettale al termine dell'esposizione [°C]	Tempo di permanenza nell'ambiente [min]	DLE - Tempo massimo esposizione [min]
1	AREA DI SCOVOLATURA	32,9	30,8	2209,5	37,3	210	325
2	POSTAZIONE DI TAKE OUT	35,3	30,8	85,3	37,2	15	296
3	AREA DI COLLAUDO	27,4	30,8	2289,1	37,3	480	480

Tabella 4.2.7. Tabella di riepilogo degli indici di stress termico WBGT, Water Loss e la temperatura rettale ed il tempo massimo di esposizione DLE [24] relativi agli ambienti termici ed ai parametri soggettivi esame.

Dai risultati precedentemente ottenuti degli indici PMV e PPD si può concludere che nelle aree operative oggetto dell'indagine del secondo caso studio la sensazione termica globale provata dai lavoratori sia quella del discomfort caldo / molto caldo. In particolare, dall'analisi degli indici WBGT e dal confronto con i rispetti valori limite relativi al soggetto acclimatato, si può osservare come soltanto presso l'*Area di Scovolatura* e la *Postazione di Take Out* siano presenti condizioni tali da favorire l'insorgere di situazioni stress termico nei soggetti esposti, ciononostante dall'analisi condotta secondo il metodo del PHS si è riscontrato che i massimi tempi limite d'esposizione non vengono superati e pertanto l'esposizione è da ritenersi accettabile.

In conclusione, sebbene nelle aree e postazioni operative in esame la sensazione termica globale provata dai lavoratori sia quella di discomfort caldo / molto caldo, non sono presenti condizioni microclimatiche tali da costituire un rischio per la salute del personale lavorativo in quanto il tempo limite d'esposizione all'ambiente severo caldo non viene superamento. In ogni caso, al fine di ridurre la condizione di stress termico provata dai lavoratori che operano presso tali aree, sarà necessario adottare misure di carattere tecnico e/o organizzative come la riduzione dell'emissività delle superfici calde (ad esempio interponendo delle superfici riflettenti tra le sorgenti radianti e il lavoratore) o l'adozione di un sistema di ventilazione in prossimità delle sorgenti di calore.

[24] Gli indicatori di stress termico Water Loss, temperatura rettale e tempo massimo di stazionamento sono stati calcolati facendo riferimento alle normali condizioni operative e pertanto si è considerato un soggetto medio (altezza 1,7 m e peso 70 kg), acclimatato ed avente la possibilità di bere liberamente.

CAPITOLO 5

VALUTAZIONE E ANALISI DEL METABOLISMO ENERGETICO SECONDO IL LIVELLO 3.A

Analisi del rischio microclimatico condotta utilizzando il metodo di analisi dell'intensità dell'attività metabolica di Livello 3.A

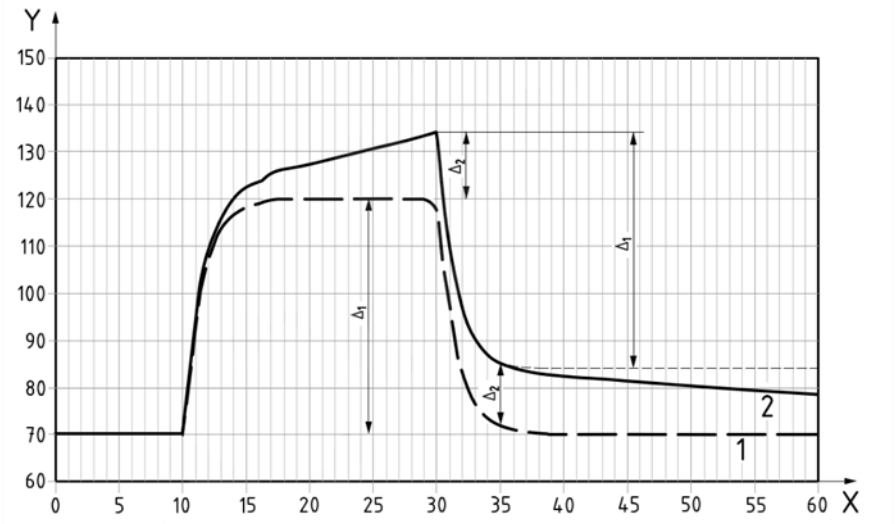
5.1 La procedura di raccolta dati e di valutazione della frequenza cardiaca

Come discusso nei precedenti capitoli, ad influenzare gli scambi termici che avvengono tra la persona e l'ambiente circostante e quindi la sensazione di comfort/discomfort e l'eventuale condizione di stress termico provato dall'individuo sono i parametri ambientali che caratterizzano localmente l'ambiente termico ed i parametri individuali relativi alla mansione svolta e all'abbigliamento indossato. La precisione degli indici microclimatici introdotti dalle norme tecniche internazionali vigenti che consentono di valutare tali condizioni [18;35;36;38] dipende non soltanto dall'accuratezza delle formule dei relativi modelli, ma anche dalla precisione delle misurazioni effettuate e della stima dei parametri ambientali, del metabolismo energetico e dell'isolamento termico dell'abbigliamento. Di conseguenza, per poter analizzare al meglio le condizioni di rischio microclimatico presenti, tali parametri dovranno essere valutati utilizzando i metodi di analisi più precisi tra quelli a disposizione. Tuttavia, nonostante la precisione dei parametri ambientali dipenda dalla strumentazione di misura e non sia possibile valutare l'isolamento termico mediante l'uso dei manichini termici, ai fini operativi il metabolismo energetico viene normalmente stimato adottando le procedure di analisi di *Livello 1 – Controllo* e di *Livello 2 – Analisi* definite dalla norma UNI EN ISO 8996 [20] anche se i risultati ottenuti presentano il maggior grado di incertezza [19;20]. Infatti, come discusso al *Paragrafo 3.2.3*, la metodologia di analisi di *Livello 3.A – Analisi - Misurazione della frequenza cardiaca in condizioni definite* risulta essere quella che in un contesto lavorativo, permette di ottenere la migliore stima dell'intensità dell'attività metabolica e consentire quindi una miglior valutazione degli indici di comfort/discomfort e delle condizioni di stress termico a cui i lavoratori sono sottoposti. Tuttavia negli ambienti di lavoro in cui le mansioni svolte siano prevalentemente statiche, ossia nel caso in cui l'attività svolta non coinvolga i grandi gruppi muscolari bensì quelli di mani e braccia come avviene per le attività d'ufficio oggetto del secondo caso studio (*Paragrafo 4.1 PRIMO CASO STUDIO: Ambiente moderabile - Ufficio)*, il metodo d'analisi di *Livello 3* non può essere applicato [20]. Nello specifico, sebbene negli ambienti termicamente moderabili come gli uffici l'aumento della frequenza cardiaca dovuto allo stress termico ΔHR_T sia trascurabile, non lo sono invece quelli legati ai carichi muscolari statici e mentali i quali, non potendo essere valutati in alcun modo, portano inevitabilmente ad una sovrastima del reale dispendio energetico [20] pregiudicando quindi la corretta valutazione delle reali condizioni di comfort/discomfort e stress termico. Pertanto, si è deciso di condurre una seconda valutazione presso la sede oggetto del secondo caso studio (*Paragrafo 4.2 SECONDO CASO STUDIO: Ambiente severo caldo indoor – Vetreria Industriale*) al fine di verificare se una valutazione del metabolismo energetico mediante cardiofrequenzimetri consenta effettivamente di ottenere una valutazione più accurata delle condizioni microclimatiche presenti e stabilire l'entità dello scostamento tra i risultati ottenuti rispetto a quelli ottenibili facendo riferimento al metodo di *Livello 1 – Controllo* precedentemente utilizzato.

Ai fini della valutazione del metabolismo energetico secondo il metodo di analisi di *Livello 3.A – Analisi - Misurazione della frequenza cardiaca in condizioni definite* [20], le frequenze cardiache dei lavoratori esposti nelle aree oggetto dell'indagine sono state monitorate minuto per minuto tramite l'utilizzo di cardiofrequenzimetri a fascia toracica. Assumendo che durante le attività lavorative le componenti della

frequenza cardiaca relative al carico muscolare statico, mentale e respiratorio siano trascurabili rispetto a quella di origine metabolica associata al carico muscolare dinamico ΔHR_M e supponendo che l'intensità dell'attività metabolica rimanga costante durante l'intera fase di lavoro (ovvero che ΔHR_T aumenti linearmente nel tempo), facendo riferimento alla procedura di valutazione illustrata all'*Allegato C* [20] e al metodo di correzione della frequenza cardiaca per effetto termico riportato all'*Allegato E* [20], la procedura di analisi della frequenza cardiaca adottata si è articolata nelle seguenti fasi:

1) I cardiofrequenzimetri sono stati fatti indossare in un ambiente termicamente moderato (spogliatoio) e, assicurandosi che i lavoratori fossero in una condizione di riposo e al netto del tempo di risposta dei sensori, si è atteso in tale ambiente per un tempo di circa 10 minuti al fine di poter valutare la frequenza cardiaca a riposo HR_0 [20];
2) Essendo l'ambiente termico classificabile come severo caldo, la componente della frequenza cardiaca ΔHR_T non è trascurabile; pertanto, facendo riferimento alla procedura di correzione riportata nell'*Allegato E* [20], si è deciso di considerare un ciclo di lavoro della durata di 20 minuti;
3) Sempre facendo riferimento alla procedura di correzione riportata nell'*Allegato E* [20] al termine del ciclo di lavoro, i lavoratori sono stati fatti ritornare nell' ambiente di riposo termicamente moderato (spogliatoio) per un tempo di almeno 15 minuti in modo da poter valutare il valore ΔHR_T necessario alla correzione della frequenza cardiaca media misurata durante lo svolgimento delle mansioni.



X *Tempo [min]*

1 *Evoluzione della frequenza cardiaca in un ambiente senza vincoli termici*

2 *Evoluzione della frequenza cardiaca in un ambiente termicamente vincolato*

Y *Frequenza cardiaca [bpm]*

Δ_1 *Incremento frequenza cardiaca di origine metabolica (ΔHR_M) [bpm]*

Δ_2 *Incremento frequenza cardiaca di origine termica (ΔHR_T) [bpm]*

Figura 5.1.1 Correzione della misura della frequenza cardiaca per effetto termico riportata nell'Allegato E [20]

Al termine della registrazione della frequenza cardiaca sono state raccolte le altre informazioni necessarie ai fini della valutazione secondo il metodo di analisi di *Livello 3.A – Analisi - Misurazione della frequenza cardiaca in condizioni definite* [20], ovvero l'altezza H_b, il peso W_b, il sesso è l'età dei lavoratori che hanno indossato i cardiofrequenzimetri.

Le procedure e i metodi di analisi dell'isolamento termico e dei parametri ambientali applicati ai fini della valutazione delle condizioni di comfort/discomfort e stress termico provate dai lavoratori sono invece rimaste analoghe a quelle adottate al *Paragrafo 4.2 SECONDO CASO STUDIO: Ambiente severo caldo indoor – Vetreria Industriale*.

5.2 Misure e interpretazione dei risultati ottenuti

A differenza della precedente analisi condotta presso l'azienda specializzata nella produzione di articoli in vetro pressato (*Paragrafo 4.2 SECONDO CASO STUDIO: Ambiente severo caldo indoor – Vetreria Industriale*), la seguente valutazione delle condizioni di comfort/discomfort globale e stress termico provato dai lavoratori si è concentrata presso l'area operativa a maggior stazionamento ed in cui, in riferimento ai risultati precedentemente ottenuti, le condizioni microclimatiche sono risultate essere più critiche, ovvero:

1. L'*Area di Scovolatura*;

Analogamente alle valutazioni condotte nel *Capitolo 4*, per l'*Area di Scovolatura* sono stati determinati i parametri ambientali necessari ai fini della valutazione degli indici microclimatici attraverso l'utilizzo di una centralina microclimatica DELTA OHM. Nella tabella seguente vengono riportati i valori relativi ai parametri ambientali di temperatura, umidità, velocità e pressione dell'aria ottenuti per tali aree.

Dati Ambientali Acquisiti - ID Misura 1: AREA DI SCOVOLATURA				
Indicatore	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std**
Temp. bulbo umido Tw [°C]	29,4	29	29,1	0,1
Temp. globotermometro Tg [°C]	46,6	46,5	46,6	0,0
Temp. aria Ta [°C]	46,4	45,7	46,1	0,2
Umidità relativa RH [%]	27,2	25,6	26,2	0,4
Velocità dell'aria [m/s]	1,39	0,56	0,83	0,2
Pressione atmosferica Pr [hPa]	1005,4	1005,4	1005,4	0,0
Temperatura radiante [°C]	48	46,7	47,3	0,4

Tabella 5.2.1 Parametri ambientali acquisiti e calcolati necessari ai fini della valutazione delle condizioni di comfort/discomfort e dello stress termico provato dai lavoratori presso l'AREA DI SCOVOLATURA

Successivamente per il personale impiegato presso l'*Area di Scovolatura* sono stati definiti i parametri soggettivi e nello specifico, a seguito dell'osservazione dalla tipologia di mansioni svolte e del vestiario indossato, per la seguente valutazione è stato adottato un unico parametro soggetto ovvero

- Parametro soggetto 1: Addetto alla produzione

In particolare, poiché presso tali aree l'abbigliamento indossato dagli addetti alla produzione risulta essere univocamente definito, facendo riferimento ai valori dei singoli capi d'abbigliamento indossati $I_{cl,u}$ riportati nelle *Tabelle B.1 e B.2* [25] ed alla procedura di analisi adottata al *Paragrafo 4.2*, l'isolamento termico dell'abbigliamento indossato dai singoli lavoratori I_{cl} risulta essere pari a

$$I_{cl} = 0{,}161 + 0{,}835 \sum I_{clu} = 0{,}161 + 0{,}835 \times (0{,}04 + 0{,}25 + 0{,}26 + 0{,}05 + 0{,}08 + 0{,}34) = 1{,}05\ clo \quad (5.1)$$

Nei seguenti paragrafi verranno analizzate le condizioni di comfort/discomfort e stress termico provato dagli operatori facendo riferimento alla procedura di analisi del metabolismo energetico di *Livello 1 – Controllo* e di *Livello 3.A – Analisi - Misurazione della frequenza cardiaca in condizioni definite*, rispettivamente nel *Paragrafo 5.2.1* e *Paragrafo 5.2.2*.

5.2.1 Analisi microclimatica condotta mediante l'uso del metodo di valutazione di Livello 1

Analogamente alla procedura di analisi adottata al *Paragrafo 4.2*, facendo riferimento al metodo di valutazione del metabolismo energetico di *Livello 1 - Controllo* [20], la classe metabolismo corrispondente alle mansioni svolte presso l'*Area di Scovolatura* è quella di *Livello 1 – Basso tasso metabolico* dal momento che le attività lavorative vengono svolte in piedi e queste richiedono l'utilizzo di utensili di piccole e medie dimensioni. Pertanto, poiché per una persona standard il valore dell'area di superficie corporea è pari a 1,8 m^2 [36], il metabolismo energetico medio risulta essere sarà pari a:

$$M_{medio} = \frac{(125 + 235)}{2}\ W \times \frac{1}{1{,}8\ m^2} = 100\ \frac{W}{m^2} \tag{5.2}$$

Di seguito viene riportata una tabella riepilogativa dei parametri di isolamento termico e metabolismo energetico adottati per lo svolgimento dell'analisi degli indici di comfort/discomfort e stress termico presso l'*Area di Scovolatura*.

Parametro Soggetto	Descrizione	Vestiario	Isolamento termico dell'abbigliamento indossato [clo]	Intensità dell'attività metabolica [W/m^2]
1	Addetto alla produzione	Biancheria intima, maglietta a maniche corte, pantaloni dritti larghi, calze, scarpe, guanti anticalore, camicia ignifuga	1,05 clo	100 W/m^2

Tabella 5.2.2 Tabella di riepilogo del vestiario indossato dal parametro soggetto Addetto alla produzione e dei relativi valori di isolamento I_{cl} [clo] e metabolismo energetico [met]

Successivamente, utilizzando i parametri ambientali precedentemente ottenuti e dopo aver implementato in un file di calcolo Excel le procedure di analisi introdotte dalle norme UNI EN ISO 7730 [18]; UNI EN ISO 7243 [35] e UNI EN ISO 7933 [36] è stato possibile valutare gli indici di comfort/discomfort termico globale e lo stress termico provato dai lavoratori. Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti considerando un soggetto non acclimato (*ID MISURA 1.1**) e un soggetto acclimatato (*ID MISURA 1.2*) utilizzando la metodologia di analisi del metabolismo energetico di *Livello 1* e i grafici dell'andamento temporale dell'indice PMV presso l'*Area di Scovolatura* mentre nell'*Allegato 3* viene riportata la relativa scheda di calcolo.

ID MISURA	DESCRIZIONE AMBIENTE	PARAMETRO SOGGETTO	Indice PMV [-]	Indice PPD [%]
1.1*	AREA DI SCOVOLATURA	Parametro Soggetto 1	4,88	100
1.2	AREA DI SCOVOLATURA	Parametro Soggetto 1	4,88	100

Tabella 5.2.3 Tabella di riepilogo degli indici di comfort/discomfort termico PMV e PPD relativi all'ambiente termico e parametro soggettivo in esame utilizzando il metodo di valutazione di Livello 1 del metabolismo energetico

Parametri Soggettivi e Indice PMV/PPD – ID Misura 1: AREA DI SCOVOLATURA								
ID MISURA	**DESCRIZIONE AMBIENTE**	**WBGT eff [°C]**	**WBGT limite acclimatato [°C]**	**WBGT limite NON acclimatato [°C]**	**Water Loss al termine dell'esposizione [g]**	**Temperatura rettale al termine dell'esposizione [°C]**	**Tempo di permanenza nell'ambiente [min]**	**DLE - Tempo massimo esposizione [min]**
1.1*	*AREA DI SCOVOLATURA*	34,4	30,8	28,1	622,4	37,5	60	143
1.2	*AREA DI SCOVOLATURA*	34,4	30,8	28,1	2563,7	37,3	210	282

Tabella 5.2.4 Tabella di riepilogo degli indici di stress termico WBGT, Water Loss e la temperatura rettale ed il tempo massimo di esposizione DLE [25] relativi agli ambienti termici e parametri soggettivi esame utilizzando il metodo di valutazione di Livello 1 del metabolismo energetico per un soggetto non acclimatato e uno acclimatato

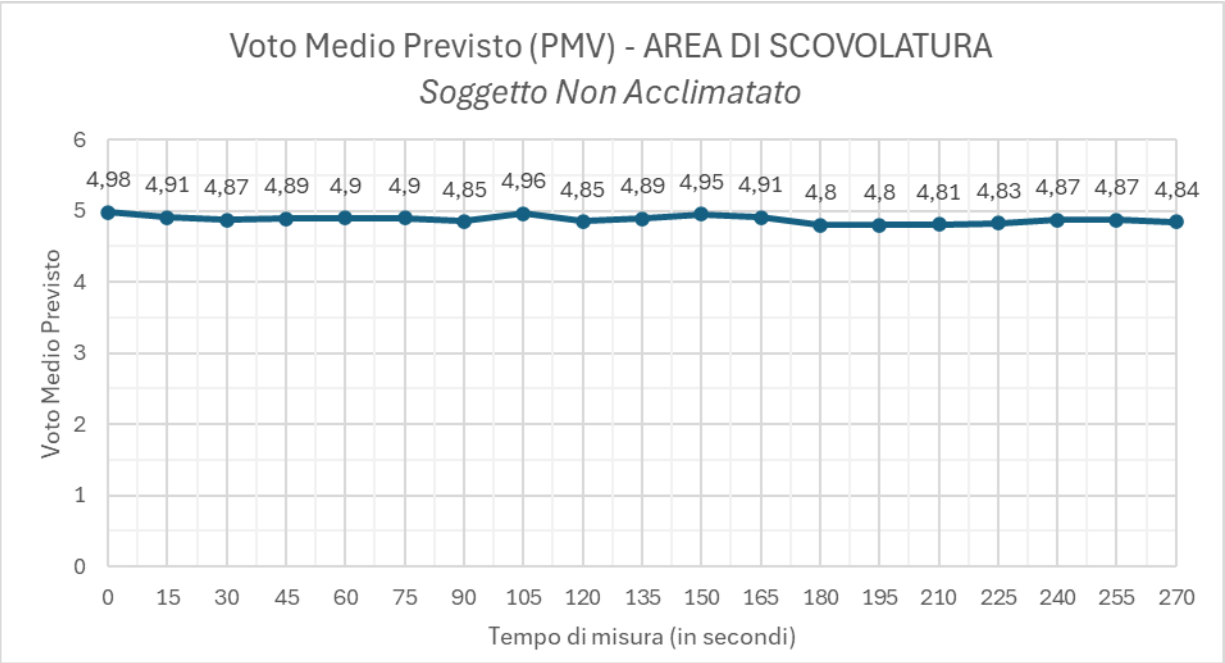


Grafico 5.2.1 Andamento temporale del Voto Medio Previsto (PMV) relativo al soggetto non acclimato (ID MISURA 1.1) presso l'AREA DI SCOVOLATURA*

[25] Gli indicatori di stress termico Water Loss, temperatura rettale e tempo massimo di stazionamento sono stati calcolati facendo riferimento alle normali condizioni operative; pertanto si è considerato un soggetto medio (altezza 1,7 m e peso 70 kg), avente la possibilità di bere liberamente. La condizione di soggetto non acclimatato è stata considerata soltanto per il soggetto *ID 1.1**, mentre per il soggetto *ID 1.2* è stata considerata quella di soggetto acclimatato.

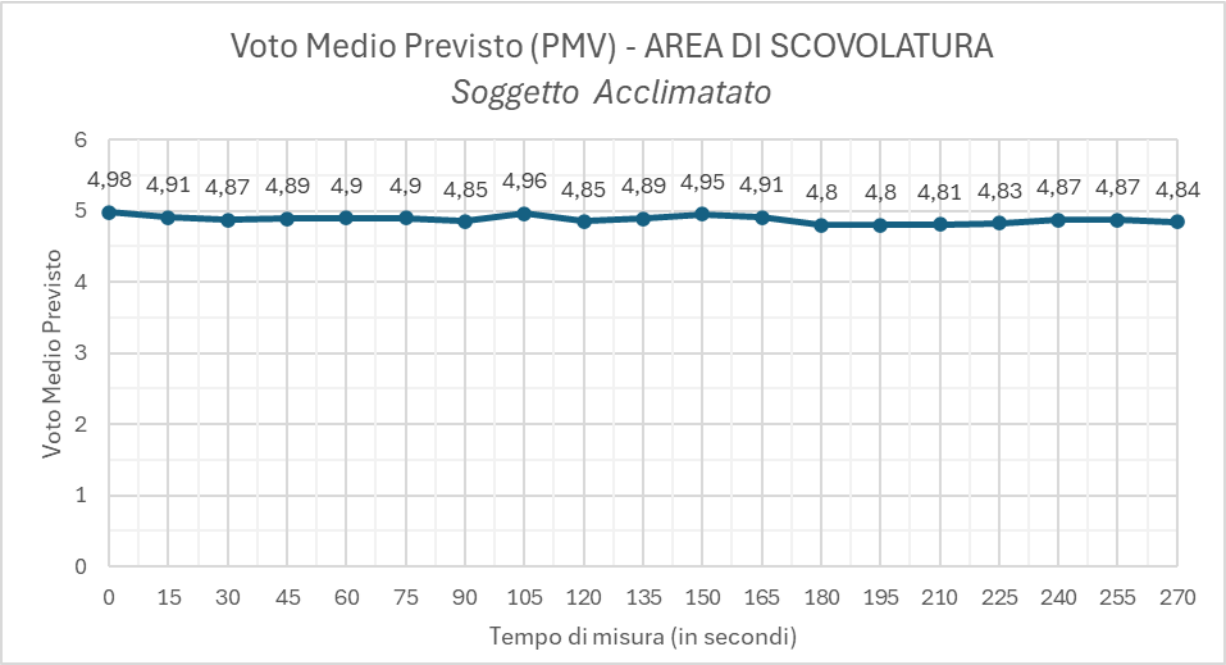


Grafico 5.2.2 Andamento temporale del Voto Medio Previsto (PMV) relativo al soggetto acclimato (ID MISURA 1.2) presso l'AREA DI SCOVOLATURA*

In linea ai risultati precedentemente ottenuti al *Paragrafo 4.2*, dall'analisi degli indici di discomfort globale PMV e PPD si può concludere che presso l'*Area di Scovolatura* sono presenti delle condizioni tali da far provare ai lavoratori una sensazione di discomfort termico di molto caldo. In particolare. le analisi del WBGT e del PHS evidenziano come seppure tali condizioni siano in grado di favorire nel soggetto acclimatato e non acclimato l'insorgere di situazioni di stress termico nei soggetti esposti, i tempi limite d'esposizione non vengono superati e pertanto le esposizioni a tale ambiente severo caldo sono da ritenersi accettabili.

5.2.2 Analisi microclimatica condotta mediante l'uso del metodo di valutazione di Livello 3.A

Secondo il metodo di analisi del metabolismo energetico di *Livello 3.A – Analisi - Misurazione della frequenza cardiaca in condizioni definite* [20], la valutazione dell'intensità dell'attività metabolica richiede oltre al monitoraggio della frequenza cardiaca anche la conoscenza dei parametri individuali che contraddistinguo i diversi lavoratori coinvolti nell'indagine, ossia il sesso, l'età, l'altezza H_b e il peso W_b. Pertanto, dopo aver ritenuto che un numero di cinque lavoratori di cui uno non acclimatato (ovvero *ID MISURA 1.1* – Sensore 1*) fosse sufficientemente adeguato a rappresentare il metabolismo energetico delle mansioni svolte nelle aree operative in esame, per ciascuno di essi è stata rilevata la frequenza cardiaca secondo la procedura descritta al *Paragrafo 5.1* e ricavate le caratteristiche individuali necessarie ai fini del calcolo. Nella tabella seguenti vengono riportati le frequenze cardiache medie HR_m monitorate durante lo svolgimento delle attività presso l'*Area di Scovolatura* e i parametri individuali di ciascun operatore, mentre nel grafico vengono riportati gli andamenti temporali delle frequenze cardiache HR misurate durante le fasi descritte al *Paragrafo 5.1*.

Parametri Individuali Acquisiti – ID Misura 1: AREA DI SCOVOLATURA						
ID Misura Parametro Soggetto		Sesso	Eta [anni]	Peso W_b [kg]	Altezza H_b [cm]	HR_{media} [bpm]
1.1*	**Sensore 1**	uomo	26	64	175	102
1.2	**Sensore 2**	uomo	27	83	180	95
1.3	**Sensore 3**	uomo	25	70	173	100
1.4	**Sensore 4**	uomo	32	92	185	103
1.5	**Sensore 5**	uomo	29	68	177	94

Tabella 5.2.5 Parametri soggetti dei lavoratori coinvolti nell'indagine presso l'AREA DI SCOVOLATURA

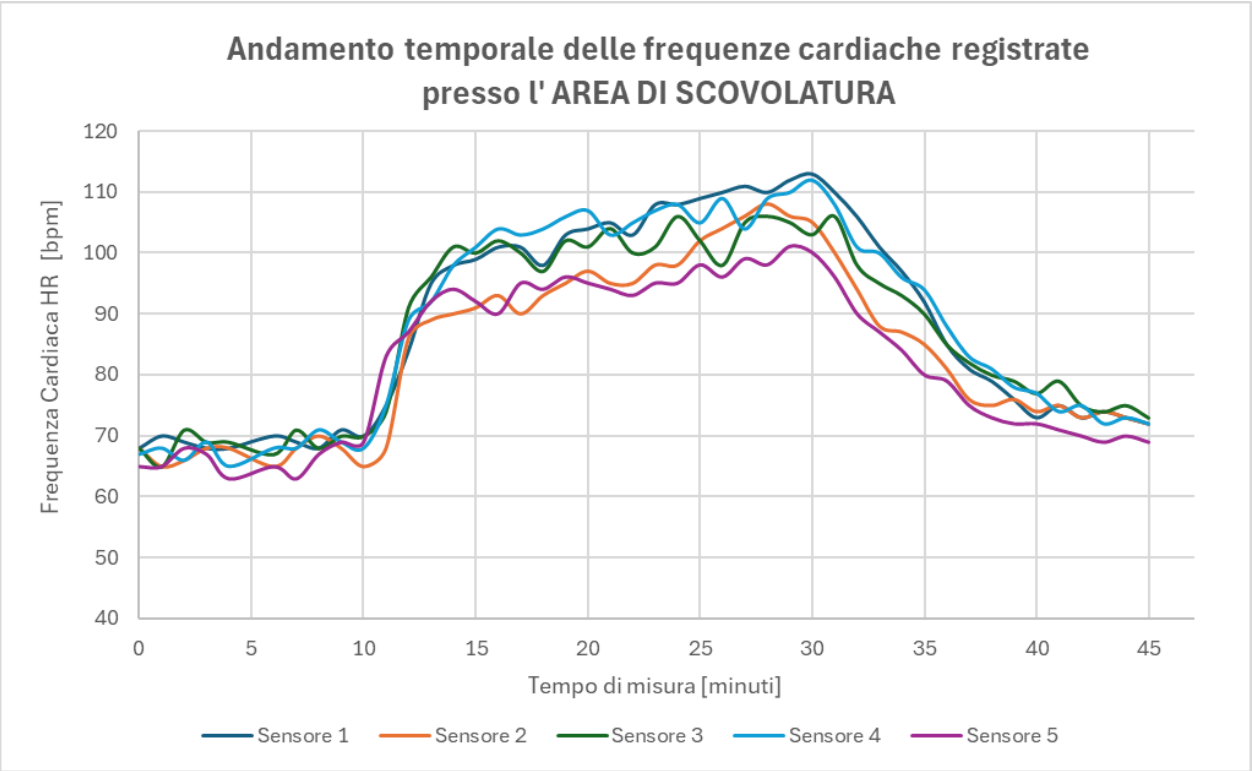


Grafico 5.2.3 Andamento temporale della frequenza cardiaca dei lavoratori presso l'AREA DI SCOVOLATURA

Una volta noti i parametri individuali e l'andamento temporale delle frequenze cardiache di ogni singolo lavoratore, facendo riferimento alle formule descritte nel *Capitolo 3* è stato possibile valutare per ognuno di essi i parametri intermedi necessari ai fini del calcolo del metabolismo energetico secondo il metodo di analisi di *Livello 3.A* [20], i quali vengono riportati nelle seguenti tabelle.

Parametri Intermedi di Valutazione – ID Misura 1: AREA DI SCOVOLATURA						
ID	**Area superficie corporea A_{Du} [m²]**	**Metabolismo energetico a riposo M_0 [W]**	**Frequenza cardiaca a riposo HR_0 [bpm]**	**Frequenza cardiaca massima HR_{max} [bpm]**	**Massima capacità di lavoro MWC [W]**	**Aumento della frequenza cardiaca RM [bpm / W]**
1.1*	1,78	106,8	68	189,8	838	0,167
1.2	2,03	121,8	65	189,1	1000	0,141
1.3	1,83	109,8	68	190,5	889	0,157
1.4	2,16	129,6	65	185,6	1040	0,132
1.5	1,84	110,4	63	187,7	857	0,167

Tabella 5.2.6 Parametri intermedi necessaria ai fini della valutazione del metabolismo energetico delle attività svolte presso l'AREA DI SCOVOLATURA

Tuttavia, come evidenziato dalle valutazioni microclimatiche condotte nel *Paragrafo 4.2* e nel *Paragrafo 5.2.1*, presso l'*Area di Scovolatura* i parametri ambientali e soggettive sono tali da indurre nei lavoratori una condizione di stress termico a causa dell'intesta sollecitazione del loro sistema di termoregolazione durante lo svolgimento delle attività lavorative. In particolare, dall'osservazione del *Grafico 5.2.2* e delle linee di tendenza delle frequenze cardiache registrate (*Grafico 5.2.3*) si può affermare che le frequenze cardiache siano aumentate con un andamento pressoché lineare durante la fase di lavoro e poiché durante il periodo di registrazione ciascun operatore ha continuato a svolgere la propria attività, è ragionevole supporre che anche l'intensità dell'attività metabolica sia rimasta costante. Pertanto l'incremento della frequenza cardiaca osservato è attribuibile alla condizione di stress termico provata dagli operatori e dunque la componete della frequenza cardiaca ΔHR_T nella valutazione del metabolismo energetico non potrà essere trascurata e dunque le frequenze cardiache medie HR_m relative alla fase di lavoro dovranno essere corrette facendo riferimento formula di correzione (3.21). Nelle tabelle seguenti vengono riportate per ciascuna lavoratore ed area operativa le frequenze cardiache misurate al quinto minuto di recupero nell'ambiente termicamente neutro $\Delta HR_{T,rec.5}$ e le frequenze cardiache che realmente corrispondono alla tipologia di mansione svolta HR_{eff}. Nota quindi la HR_{eff}, facendo riferimento alle formule riportate al *Paragrafo 3.2.2.3* e ai valori precedentemente ottenuti è stato possibile stimare per ciascun operatore il metabolismo energetico relativo alle attività svolte in funzione delle caratteristiche individuali.

Frequenza Cardiaca Effettiva e Metabolismo Energetico – ID Misura 1: AREA DI SCOVOLATURA				
ID	**Frequenza cardiaca media HR_{media} [bpm]**	**Frequenza cardiaca al 5° minuto di recupero $\Delta HR_{T,rec.5}$ [bpm]**	**Frequenza cardiaca HR_{eff} [bpm]**	**Intensità dell'attività metabolica M_i [W/m²]**
1.1*	102	92	90,0	134,2
1.2	95	85	85,0	129,7
1.3	100	90	89,0	133,0
1.4	103	94	88,5	142,1
1.5	94	80	85,5	133,3
Media	-	-	-	134,5

Tabella 5.2.7 Valutazione della frequenza cardiaca effettiva e del metabolismo energetico associato a ciascun lavoratore presso l'AREA DI SCOVOLATURA

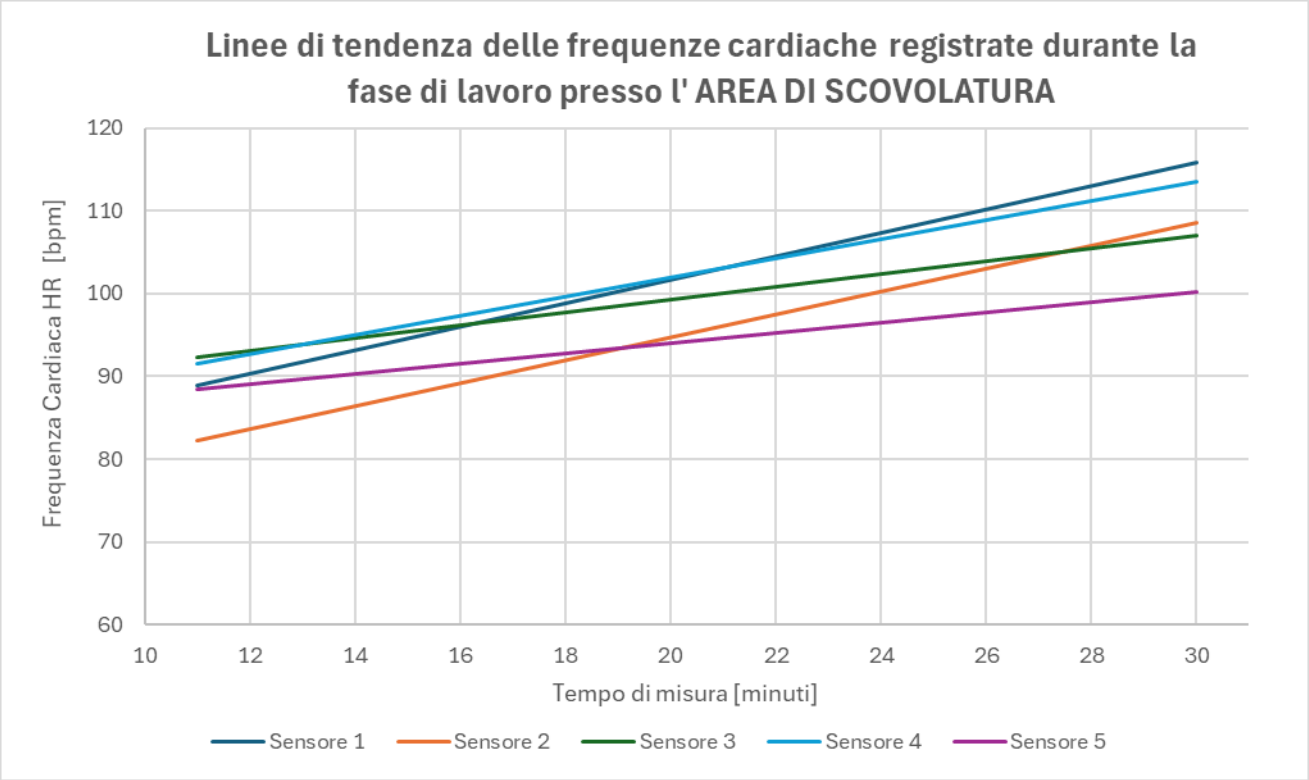


Grafico 5.2.4 Linee di tendenza delle frequenze cardiache dei lavoratori registrate durante la fase di lavoro presso l'AREA DI SCOVOLATURA

A questo, a seguito della rilevazione dei parametri ambientali e delle caratteristiche dell'isolamento termico del vestiario e dopo aver determinato l'intensità dell'attività metabolica relativa alle attività svolte da ciascun lavoratore presso l'*Area di Scovolatura*, è stato possibile procedere alla valutazione individuale degli indici di comfort/discomfort termico globale e dell'entità dello stress termico provato mediante il file di calcolo Excel precedentemente utilizzato al *Paragrafo 5.2.1*. Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti in ciascuna area per ogni singolo lavoratore utilizzando il metodo di analisi di *Livello 3.A* del metabolismo energetico in funzione dei parametri ambientali e soggettivi oltre ai rispettivi grafici dell'andamento temporale dell'indice PMV, mentre nell'*Allegato 4* vengono riportate le singole schede di calcolo.

Parametri Soggettivi e Indice PMV/PPD – ID Misura 1: AREA DI SCOVOLATURA					
ID MISURA	**DESCRIZIONE AMBIENTE**	**Isolamento termico dell'abbigliamento indossato [clo]**	**Intensità dell'attività metabolica [W/m²]**	**Indice PMV**	**Indice PPD**
1.1*	*AREA DI SCOVOLATURA*	1,05	134,2	4,81	100,0
1.2	*AREA DI SCOVOLATURA*	1,05	129,7	4,78	100,0
1.3	*AREA DI SCOVOLATURA*	1,05	133	4,80	100,0
1.4	*AREA DI SCOVOLATURA*	1,05	142,1	4,88	100,0
1.5	*AREA DI SCOVOLATURA*	1,05	133,3	4,81	100,0

Tabella 5.2.8 Tabella di riepilogo degli indici di comfort/discomfort termico PMV e PPD valutati utilizzando il metodo di Livello 3.A del metabolismo energetico relativi a ciascun lavoratore presso l'AREA DI SCOVOLATURA

Parametri Soggettivi e Indice PMV/PPD – ID Misura 1: AREA DI SCOVOLATURA								
ID MISURA	**DESCRIZIONE AMBIENTE**	**WBGT eff [°C]**	**WBGT limite acclimatato [°C]**	**WBGT limite NON acclimatato [°C]**	**Water Loss al termine dell'esposizione [g]**	**Temperatura rettale al termine dell'esposizione [°C]**	**Tempo di permanenza nell'ambiente [min]**	**DLE - Tempo massimo esposizione [min]**
1.1*	*AREA DI SCOVOLATURA*	34,4	29,4	26,4	578,1	37,9	60	67
1.2	*AREA DI SCOVOLATURA*	34,4	28,9	25,8	3197,4	37,8	210	270
1.3	*AREA DI SCOVOLATURA*	34,4	29,3	26,3	2897,9	37,9	210	217
1.4	*AREA DI SCOVOLATURA*	34,4	28,1	24,8	3422,1	38,2	210	150
1.5	*AREA DI SCOVOLATURA*	34,4	29,2	26,2	2913,7	38,1	210	203

Tabella 5.2.9. Tabella di riepilogo degli indici di stress termico WBGT, Water Loss e la temperatura rettale ed il tempo massimo di esposizione DLE [26] valutati utilizzando il metodo di valutazione di Livello 3.A del metabolismo energetico relativi a ciascun lavoratore presso l'AREA DI SCOVOLATURA

[26] Gli indicatori di stress termico Water Loss, temperatura rettale e tempo massimo di stazionamento sono stati calcolati facendo riferimento alle normali condizioni operative e ai parametri individuali di ogni singolo lavoratore; pertanto per ciascun soggetto sono state considerate le rispettive aree di superficie corporea A_{Du} e la possibilità di bere liberamente. La condizione di soggetto non acclimatato è stata considerata soltanto per il soggetto *ID 1.1* – Sensore 1*, mentre per gli altri è stata considerata quella di soggetto acclimatato.

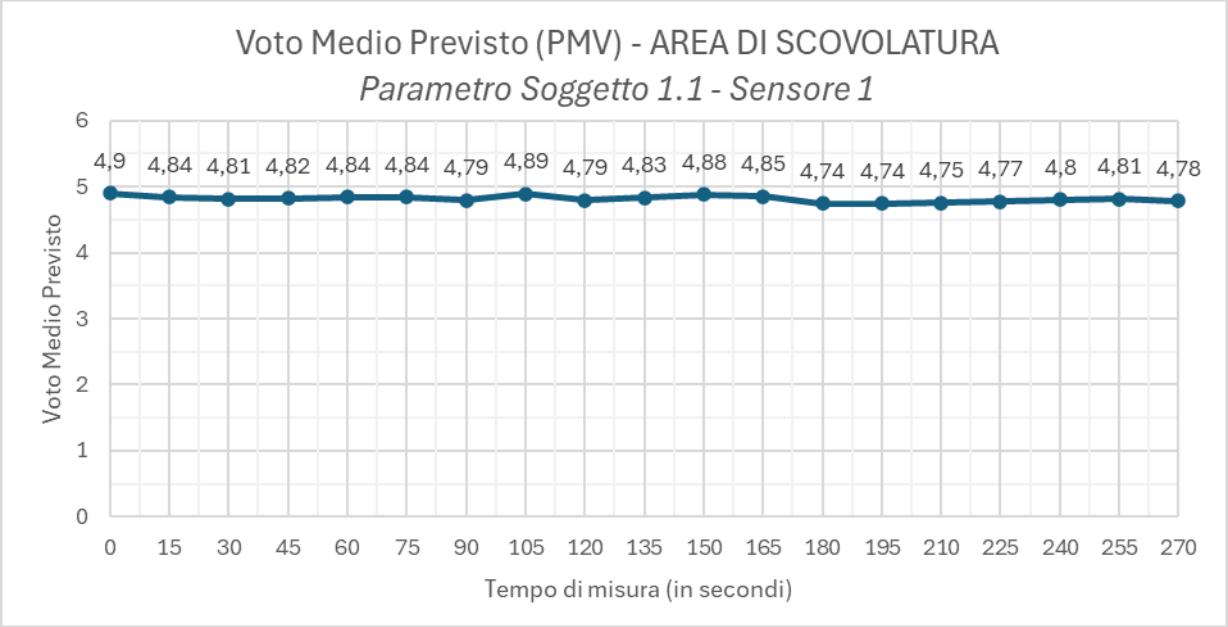


Grafico 5.2.5 Andamento temporale del Voto Medio Previsto (PMV) relativo al "Parametro Soggetto 1.1 – Sensore 1" presso l'AREA DI SCOVOLATURA

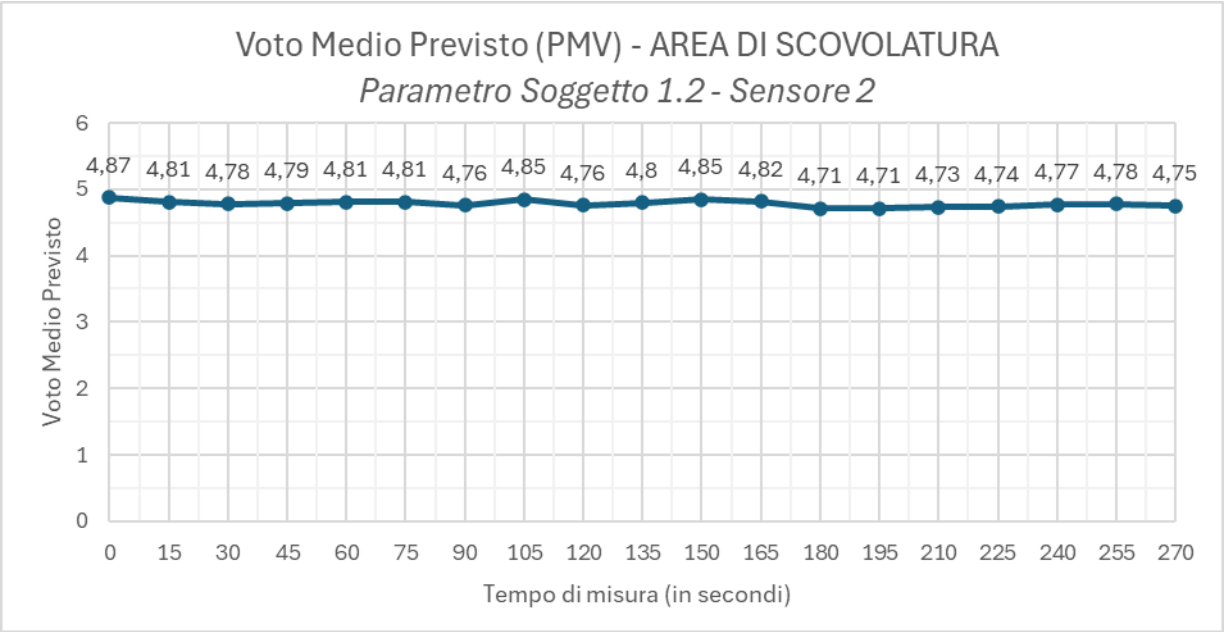


Grafico 5.2.6 Andamento temporale del Voto Medio Previsto (PMV) relativo al "Parametro Soggetto 1.2 – Sensore 2" presso l'AREA DI SCOVOLATURA

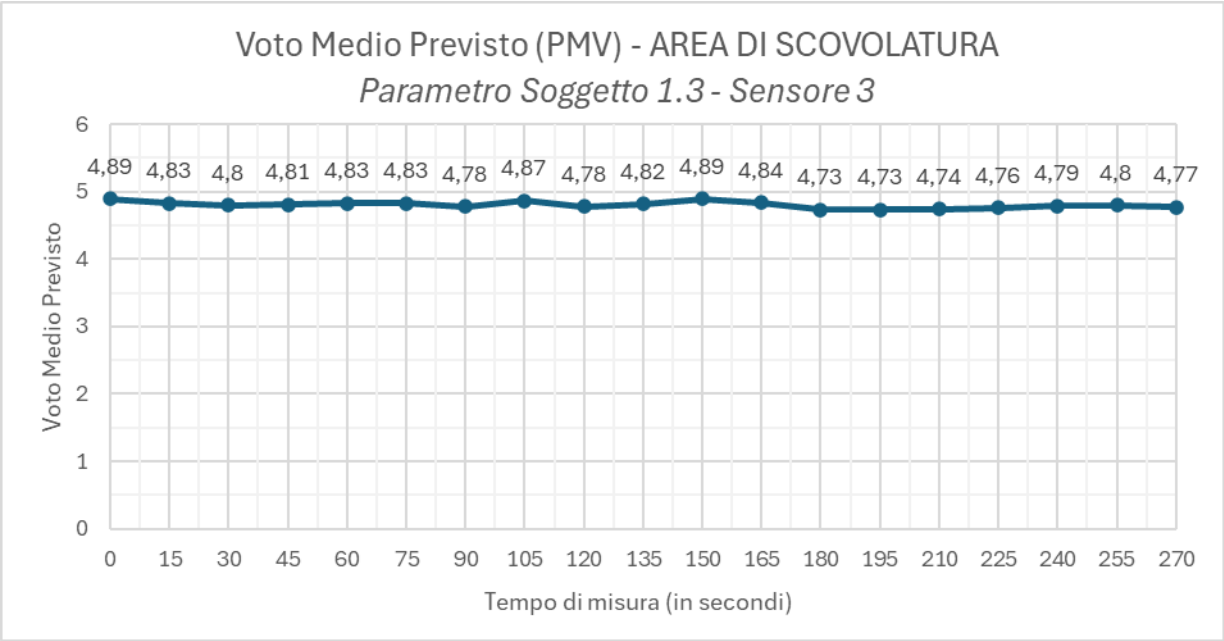


Grafico 5.2.7 Andamento temporale del Voto Medio Previsto (PMV) relativo al "Parametro Soggetto 1.3 – Sensore 3" presso l'AREA DI SCOVOLATURA

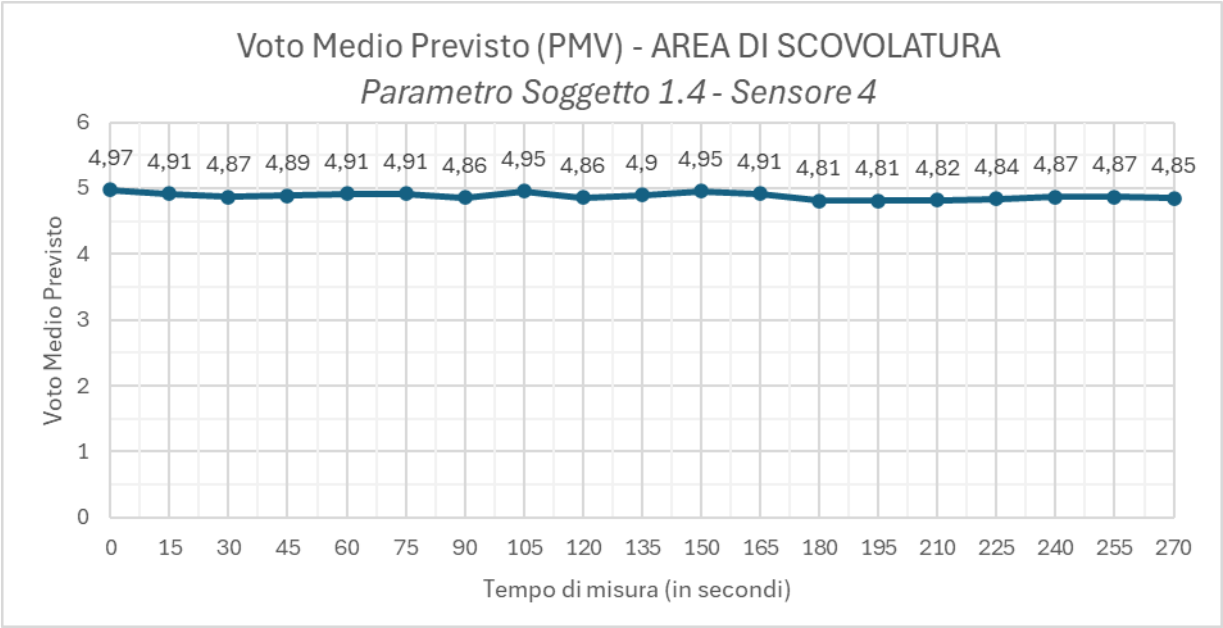


Grafico 5.2.8 Andamento temporale del Voto Medio Previsto (PMV) relativo al "Parametro Soggetto 1.4 – Sensore 4" presso l'AREA DI SCOVOLATURA

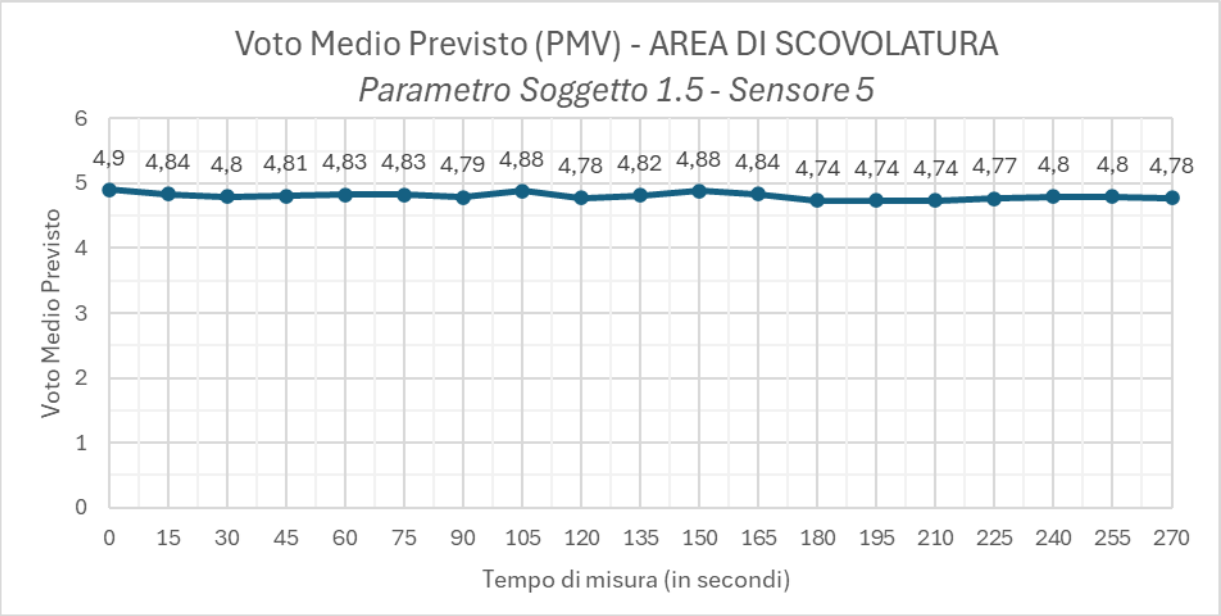


Grafico 5.2.9 Andamento temporale del Voto Medio Previsto (PMV) relativo al "Parametro Soggetto 1.5 – Sensore 5" presso l'AREA DI SCOVOLATURA

Dai risultati appena ottenuti è possibile constatare come gli indici di sensazione termica globale, le condizioni di stress termico e i tempi limite d'esposizione all'ambiente severo caldo varino da un lavoratore all'altro in funzione delle caratteristiche fisiche e frequenze cardiache registrate durante lo svolgimento delle attività. In particolare, per i lavoratori coinvolti nell'indagine è possibile osservare come, a parità di condizione di acclimatamento, i tempi limite d'esposizione all'ambiente severo caldo diminuiscano all'aumentare dell'intensità dell'attività metabolica e che soltanto per alcuni operati (*ID 1.4 – Sensore 4* e *ID 1.5 – Sensore 5*) tali tempi limite vengano superati. Tuttavia, sebbene presso l'*Area di Scovolatura* i parametri ambientai e l'abbigliamento siano univocamente definiti, i risultati ottenuti possono essere influenzati da fattori individuali che non sono noti a priori come l'effettivo stato di acclimatamento ed altri aspetti fisiologici legati allo stato di salute generale quali il livello di allenamento, l'eventuale presenza di patologie cardiovascolari, ormonali (ad esempio diabete o obesità), profili farmacologici e/o in generale condizioni di ipersensibilità permanenti e/o temporanee allo stress termico. Pertanto, al fine di caratterizzare in modo più accurato la tipologia di mansione svolta presso tale area operativa si è deciso di considerare un parametro soggetto medio avente peso, altezza e metabolismo energetico pari alla media dei valori precedentemente ottenuti. Di seguito viene riportata una tabella riepilogativa contente i parametri di isolamento termico e metabolismo energetico del soggetto medio adottati per l'analisi degli indici di comfort/discomfort e stress termico presso l'*Area di Scovolatura.*

Parametro Soggetto	**Vestiario**	**Parametri individuali Peso [kg] – Altezza [cm]**	**Isolamento termico dell'abbigliamento indossato [clo]**	**Intensità dell'attività metabolica [W/m^2]**
P.S. Medio	Biancheria intima, maglietta a maniche corte, pantaloni dritti larghi, calze, scarpe, guanti anticalore, camicia ignifuga	75,4 kg – 178 cm	1,05 clo	134,5 W/m^2

Tabella 5.2.10 Tabella di riepilogo del vestiario indossato dai parametri soggetto Addetto alla produzione – Area di Scovolatura e dei relativi valori di isolamento I_{cl} [clo] e metabolismo energetico [met]

Facendo riferimento al parametro soggetto medio ed utilizzando i parametri ambientali relativi all'*Area di Scovolatura* precedentemente ottenuti è stato possibile procedere alla valutazione degli indici di comfort/discomfort termico globale e dell'entità dello stress termico provato mediante il file di calcolo Excel precedentemente utilizzato al *Paragrafo 5.2.1*. Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti utilizzando la metodologia di analisi del metabolismo energetico di *Livello 3.A* e il grafico dell'andamento temporale dell'indice PMV, mentre nell'*Allegato 4* viene riportata la relativa scheda di calcolo.

ID MISURA	DESCRIZIONE AMBIENTE	PARAMETRO SOGGETTO	Indice PMV [-]	Indice PPD [%]
1	*AREA DI SCOVOLATURA*	**P.S. Medio**	4,81	100,0

Tabella 5.2.11 Tabella di riepilogo degli indici di comfort/discomfort termico PMV e PPD relativi agli ambienti termici ed ai parametri soggettivi in esame valutati utilizzando il metodo di Livello 3.A del metabolismo energetico

ID MISURA	DESCRIZIONE AMBIENTE	WBGT eff [°C]	WBGT limite acclimatato [°C]	Water Loss al termine dell'esposizione [g]	Temperatura rettale al termine dell'esposizione [°C]	Tempo di permanenza nell'ambiente [min]	DLE - Tempo massimo esposizione [min]
1	*AREA DI SCOVOLATURA*	34,4	28,9	3047,6	38,1	210	201

Tabella 5.2.12. Tabella di riepilogo degli indici di stress termico WBGT, Water Loss e la temperatura rettale ed il tempo massimo di esposizione DLE [27] relativi agli ambienti termici ed ai parametri soggettivi esame valutati utilizzando il metodo di Livello 3.A del metabolismo energetico

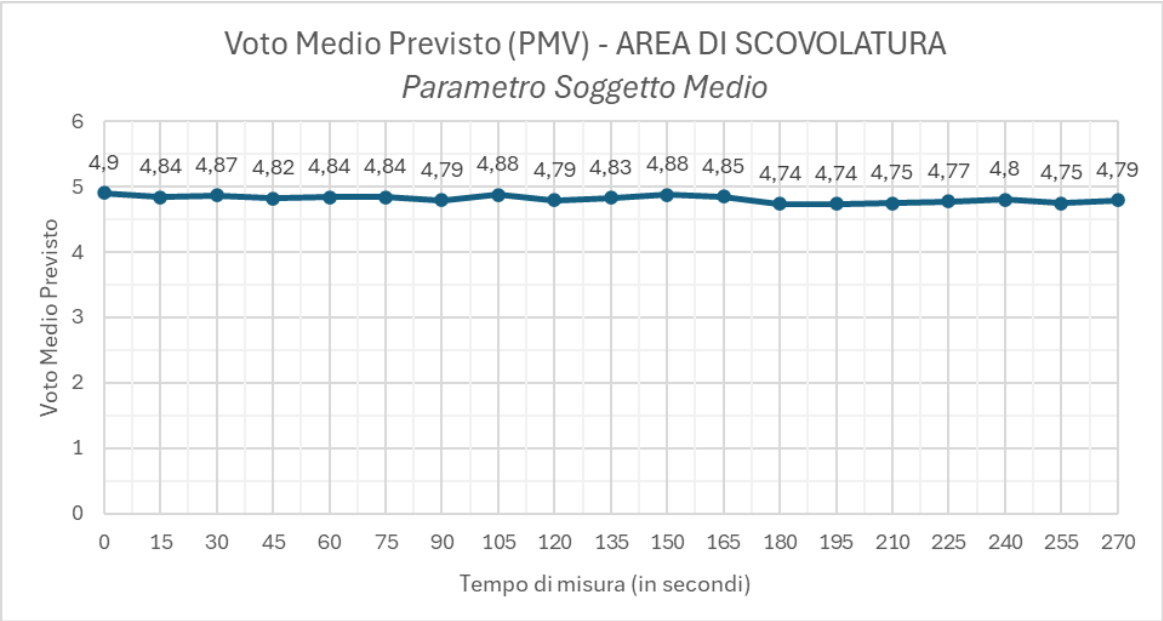


Grafico 5.2.10 Andamento temporale del Voto Medio Previsto (PMV) relativo al "Parametro Soggetto Medio" presso l'AREA DI SCOVOLATURA

[27] Gli indicatori di stress termico Water Loss, temperatura rettale e tempo massimo di stazionamento sono stati calcolati facendo riferimento alle normali condizioni operative; pertanto si è considerato un soggetto medio (altezza 1,7 m e peso 70 kg), acclimatato ed avente la possibilità di bere liberamente.

Sulla base dei risultati ottenuti utilizzando il metodo di valutazione del metabolismo energetico di *Livello 3.A – Analisi - Misurazione della frequenza cardiaca in condizioni definite* e la procedura d'analisi della frequenza cardiaca proposta nel *Paragrafo 5.1*, è possibile concludere che gli esiti della valutazione degli indici di comfort/discomfort globale risultano essere compatibili con quelli ottenuti nel *Paragrafo 5.2.1*, dimostrando come in entrambi i casi la sensazione termica provata dai lavoratori presso l'*Area di Scovolatura* sia quella di discomfort molto caldo. Tuttavia, sebbene entrambe le analisi del WBGT e del PHS abbiano riscontrato la presenza di condizioni tali da favorire l'insorgere di una situazione di stress termico nei soggetti esposti, l'analisi condotta nel *Paragrafo 5.2.2* ha evidenziato come in relazione alle caratteristiche individuali soltanto in alcuni casi i tempi limite d'esposizione vengano superati rendendo quindi solo per alcuni lavoratori l'esposizione all'ambiente severo caldo inaccettabile. In particolare, facendo riferimento al *Parametro Soggetto Medio* è possibile constatare come a differenza dei risultati ottenuti al *Paragrafo 5.2.1* anche in questo caso il tempo limite d'esposizione all'ambiente severo caldo venga superato e ciò è attribuibile al fatto che i valori di metabolismo energetico ottenuti utilizzando il metodo di analisi di *Livello 3.A* sono risultati nettamente superiori rispetto a quello adottato secondo il metodo di analisi di *Livello 1*.

5.3 Confronto e analisi dei risultati sperimentali ottenuti

A seguito dell'analisi del metabolismo energetico condotto secondo il metodo di analisi di *Livello 3.A – Analisi - Misurazione della frequenza cardiaca in condizioni definite* e dall'osservazione del *Grafico 5.2.2* e del *Grafico 5.2.3* si è potuto constatare come presso l'*Area di Scovolatura* le frequenze cardiache misurate siano aumentate con un andamento pressoché lineare durante l'intera fase di lavoro. Nello specifico, supponendo che durante l'intera fase di registrazione le componenti della frequenza cardiaca legate al carico muscolare statico, mentale e respiratorio (rispettivamente ΔHR_S, ΔHR_N e ΔHR_E) siano rimaste trascurabili rispetto a quelle associate al carico muscolare dinamico ΔHR_M e che l'intensità dell'attività metabolica sia rimasta costante, tali incrementi sono attribuibili alla condizione di stress termico provata dai lavoratori e dunque al contributo ΔHR_T che in media è risultato essere pari a 31,6 bpm. In particolare, dalla *Tabella 5.3.1* si può osservare come tra i lavoratori vi siano delle differenze significative nelle variazioni delle frequenze cardiache misurate tra l'inizio e la fine dell'attività che non soltanto dipendono dalle caratteristiche fisiche direttamente valutabili come l'età, il peso e l'altezza, ma è anche da una serie di altri fattori individuali che non possono essere direttamente quantificabili o che non è stato possibile rilevare per motivi di privacy tra cui lo stato di acclimatamento, patologie cardiovascolari e ormonali o terapie farmacologiche in grado di influenzare il sistema di termoregolazione.

ID MISURA	Frequenza cardiaca misurata all'inizio della fase di lavoro [bpm]	Frequenza cardiaca misurata alla fine della fase di lavoro [bpm]	Variazione della frequenza cardiaca misurata tra l'inizio e la fine dell'attività [bpm]	Scarto assoluto della variazione di frequenza cardiaca osservata [bpm]	Variazione percentuale della variazione di frequenza cardiaca osservata [%]
1.1*	75	113	38	6,4	50,7 %
1.2	68	105	37	5,4	54,4 %
1.3	74	103	29	2,4	39,2 %
1.4	75	112	37	5,4	49,3 %
1.5	83	100	17	14,6	20,5 %
Media	75	106,6	31,6	-	42,1 %

Tabella 5.3.1 Scarti assoluti e variazioni percentuali delle variazioni di frequenza cardiaca osservata tra l'inizio e la fine dell'attività lavorativa

L'applicazione del metodo di analisi di *Livello 3.A* [20] ha inoltre permesso di ottenere una valutazione individuale e complessiva degli indici di comfort/discomfort globale e dello stress termico con un livello di accuratezza e precisione maggiore rispetto a quelli ottenuti nel *Paragrafo 5.2.1* in cui invece è stato adottato il metodo di analisi di *Livello 1 – Controllo* [20]. Tali risultati sono attribuibili al fatto che l'uso dei cardiofrequenzimetri consente di stimare con un maggior grado di precisione l'intensità dell'attività metabolica rispetto ai valori proposti nella tabella dell'*Allegato A* [20] poiché quest'ultimi, oltre a non tenere conto della variabilità individuale che caratterizza ciascun lavoratore, forniscono soltanto un'indicazione approssimativa del dispendio energetico associato alla classe metabolica della mansione svolta. Infatti, sebbene presso l'*Area di Scovolatura* gli operatori stessero svolgendo la medesima tipologia di attività, l'applicazione del metodo di analisi di *Livello 3.A* [20] ha evidenziato che i valori di metabolismo energetico differiscono da un lavoratore

all'altro in funzione delle caratteristiche soggettive e frequenze cardiache registrate e come questi si discostino sensibilmente dal valore di riferimento adottato nella valutazione del *Paragrafo 5.2.1*. Pertanto dai risultati ottenuti si può affermare che, nonostante il numero di lavoratori coinvolti nell'indagine fosse limitato, l'utilizzo del metodo di analisi di *Livello 1* [20] abbia portato a sottostimare il valore metabolismo energetico di riferimento associato alle mansioni svolte dai lavoratori presso l'*Area di Scovlatura* rispetto a quelli ottenuti secondo il metodo di analisi di *Livello 3.A* [20] con una variazione percentuale del 34,5 % in più rispetto al valore medio considerato.

ID MISURA	Metabolismo energetico di riferimento [W/m²]	Metabolismo energetico calcolato con l'uso dei cardiofrequenzimetri [W/m²]	Scarto assoluto dei valori di metabolismo energetico misurati [W/m²]	Variazione percentuale del metabolismo Δ_M [%]
1.1*	100	134,2	0,3	34,2 %
1.2	100	129,7	4,8	29,7 %
1.3	100	133,0	1,5	33,0 %
1.4	100	142,1	7,6	42,1 %
1.5	100	133,3	1,5	33,3 %
P.S. Medio	100	134,5	-	34,5 %

Tabella 5.3.2 Scarti assoluti dei valori di metabolismo energetico misurati e variazioni percentuali tra il metabolismo energetico di riferimento ottenuto utilizzando il metodo di analisi di Livello 1 e quelli misurati secondo il metodo di analisi di Livello 3.A

Tuttavia, sebbene nelle valutazioni condotte al *Paragrafo 5.2.1* e al *Paragrafo 5.2.2* le differenze del metabolismo energetico non abbiano portato alcuna variazione significativa nella stima degli indici di comfort/discomfort globale, in quanto in entrambi i casi la sensazione termica prevista è quella di discomfort "molto caldo", nella valutazione della condizione di stress termico tali differenze hanno assunto invece un ruolo determinante. Infatti, benché entrambe le valutazioni del WBGT abbiano dimostrato come presso l'*Area di Scovolatura* siano presenti delle condizioni tali da indurre nei lavoratori una condizione di stress termico, dall'analisi condotta secondo il metodo del PHS nel *Paragrafo 5.2.*1 è possibile constatare come la sottostima dell'intensità dell'attività metabolica abbia portato ad una sovrastima dei tempi limite d'esposizione tale da rendere l'esposizione all'ambiente severo caldo accettabile. Invece i risultati ottenuti al *Paragrafo 5.2.2*, oltre ad aver dimostrato come i tempi limite d'esposizione differiscono da un lavoratore all'altro in relazione alle caratteristiche individuali ed allo stato di acclimatamento, hanno evidenziato come soltanto in alcuni casi l'esposizione all'ambiente severo caldo sia da ritenersi inaccettabile dato il superamento dei tempi limite d'esposizione. In particolare, seppure il numero di lavoratori coinvolti nell'indagine fosse limitato, è stato possibile constatare come la variazione percentuale tra il tempo limite d'esposizione ottenuto utilizzando il metabolismo energetico di riferimento nella condizione di acclimatamento e quello relativo al *Parametro Soggetto Medio* sia nell'ordine del 30 %, mentre per il soggetto non acclimato (ossia *ID – Misura 1.1**) sia superiore al 50 %.

ID MISURA	Tempo effettivo di permanenza nell'ambiente severo caldo [min]	Tempo limite d'esposizione di riferimento [min]	Tempo limite d'esposizione calcolato [min]	Scarto assoluto dei tempi limite di esposizione calcolati [min]	Variazione percentuale del tempo limite d'esposizione [%]
1.1*	60	143	67	134	53,15 %
1.2	210	282	270	69	4,26 %
1.3	210	282	217	16	23,05 %
1.4	210	282	150	51	46,81 %
1.5	210	282	203	2	28,01 %
P.S. Medio	210	282	201	-	28,72 %

Tabella 5.3.3 Scarti assoluti e variazioni percentuali tra il tempo limite di esposizione di riferimento, calcolato utilizzando il metabolismo energetico di 100 W/m² e il tempo limite di esposizione di ciascun lavoratore adottando il metabolismo energetico misurato secondo il metodo di analisi di Livello 3.A

In conclusione si può affermare che, a differenza del metodo analisi del metabolismo energetico di *Livello 1 – Controllo* [20], il metodo di *Livello 3.A – Analisi - Misurazione della frequenza cardiaca in condizioni definite* [20] consente non solo di ottenere una stima più precisa dell'intensità dell'attività metabolica associata all'attività svolta, ma permette anche di evitare una possibile sottostima del rischio associato all'esposizione negli ambienti severi caldi, in particolar modo quando i soggetti esposti sono in una condizione di non acclimatamento.

CONCLUSIONI

Alla luce del cambiamento climatico e delle ondate di calore sempre più frequenti ed intense, risulta ora più che mai necessario saper valutare con la massima accuratezza e precisione le condizioni microclimatiche presenti negli ambienti di lavoro, siano essi moderabili o severi, al fine di prevenire e ridurre al minimo i rischi per la salute e la sicurezza dei lavoratori. Nei luoghi di lavoro, il rischio da esposizione al microclima è regolamentato nell'ambito del d.lgs 81/08 al *Titolo VIII, Capo I* e, dato che tale normativa non fornisce indicazioni specifiche in merito alle metodologie di analisi da adottare per la valutazione, dalle norme tecniche internazionali vigenti che, nel caso degli ambienti moderabili e severi caldi sono la UNI EN ISO 7730 [18], la UNI EN ISO 7243 [35] e la UNI EN ISO 7933 [36] che introducono rispettivamente i metodi di analisi del PMV/PPD, del WBGT e del PHS.

Nel presente lavoro di tesi sperimentale, dall'analisi dei due casi studio trattati nel *Capitolo 4* si è potuto constatare che, sebbene negli ambienti moderabili come gli uffici non siano riscontrabili condizioni microclimatiche tali da costituire un rischio per la salute associabile alle alte temperature, ciò non è sempre vero negli ambienti severi caldi. Infatti, le analisi condotte secondo i metodi del WBGT e del PHS (rif. nel *Paragrafo 4.2* e nel *Capitolo 5*) hanno evidenziato come presso gli ambienti severi caldi le condizioni microclimatiche possano portare ad una sollecitazione del sistema di termoregolazione nei soggetti esposti tale da indurre condizioni di stress termico che possono rendere l'esposizione all'ambiente termico inaccettabile. In particolare, i risultati ottenuti col metodo sperimentale adottato nel *Capitolo* 5 hanno dimostrato come parametri individuali quali l'età, il peso e l'altezza rivestano un ruolo fondamentale non soltanto nella stima del metabolismo energetico e dei tempi limite d'esposizione, ma anche come questi siano in grado di influenzare le frequenze cardiache, per le quali si è osservato un aumento medio non trascurabile a causa della condizione di stress termico provata dai lavoratori coinvolti nell'indagine. L'applicazione del metodo di valutazione di *Livello 3.A – Analisi - Misurazione della frequenza cardiaca in condizioni definite* ha permesso inoltre di ottenere una stima molto più accurata dell'intensità dell'attività metabolica dal momento che si è osservata una variazione percentuale media del 34,5 % rispetto al valore del metabolismo energetico di riferimento ottenuto secondo il metodo di analisi di *Livello 1*, incremento che non si può ritenere trascurabile né tantomeno accettabile nell'ambito della valutazione del rischio specifico. La maggior precisione nella stima del metabolismo energetico non ha portato ad un miglioramento significativo nella valutazione delle condizioni di comfort/discomfort termico globale poiché in entrambi i casi la sensazione termica prevista è quella di "molto caldo", tuttavia dalle analisi condotte nel *Paragrafo 5.2* si è potuto constatare come questo abbia avuto un impatto significativo nella valutazione dello stress termico ed in particolar modo nella valutazione del tempo limite d'esposizione. I risultati ottenuti hanno infatti evidenziato come rispetto alla valutazione condotta utilizzando il metabolismo energetico di riferimento, i tempi limiti d'esposizione abbiano mostrato per il parametro soggetto medio acclimatato una variazione percentuale nell'ordine del 30 % ed oltre al 50 % per il soggetto nelle condizioni di non acclimatamento permettendo quindi di evitare una sottostima del rischio associato all'esposizione negli ambienti severi caldi.

Concludendo, l'applicazione del metodo di analisi del metabolismo energetico di *Livello 3.A* ha permesso, sebbene il numero di lavoratori coinvolti nell'indagine fosse limitato, di ottenere per le attività svolte una migliore stima dell'intensità dell'attività metabolica rispetto al valore di riferimento ottenuto secondo il metodo di analisi di *Livello* 1 e di conseguenza una migliore stima degli indici microclimatici e tempi limite d'esposizione. Si evidenzia inoltre che a causa del campione statistico limitato di lavoratori su cui è stato possibile installare i sensori sperimentali e considerando l'impossibilità di determinare alcuni fattori individuali come l'effettivo stato di acclimatamento, la presenza di patologie cardiovascolari, ormonali o che richiedano l'uso di farmaci in grado di influenzare il sistema di termoregolazione, non è stato al momento possibile determinare in maniera univoca un coefficiente correttivo in grado di correlare l'evidenza sperimentale con i valori tabellari proposti dalle normative. I risultati ottenuti, tuttavia, suggeriscono un importante sviluppo futuro che consiste nel verificare e determinare, considerando un campione di lavoratori statisticamente più rappresentativo di quello adottato, un coefficiente di correlazione e di un adeguamento dell'analisi del rischio dalla "teoria" alla "pratica".

BIBLIOGRAFIA

[1] R.Bevilacqua, "Cambiamenti climatici e sicurezza sul lavoro: una sintesi della bibliografia", Atti dei seminari di aggiornamento Inail dei professionisti Ctss, Csa, Cit "Sicurezza, sostenibilità: le sfide della quinta rivoluzione industriale", 15 dicembre 2023

[2] FORSTER, Piers M., et al. Indicators of Global Climate Change 2023: annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence. Earth System Science Data, 2024, 16.6: 2625-2658.

[3] MARCHETTI, Enrico; CAPONE, Pasquale; FREDA, Daniela. Climate change impact on microclimate of work environment related to occupational health and productivity. Annali dell'Istituto superiore di sanità, 2016, 52.3: 338-342.

[4] NILSSON, Maria; KJELLSTROM, Tord. Climate change impacts on working people: how to develop prevention policies. Global Health Action, 2010, 3.1: 5774.

[5] LUNDGREN, Karin, et al. Effects of heat stress on working populations when facing climate change. Industrial health, 2013, 51.1: 3-15.

[6] SCHULTE, P. A., et al. Advancing the framework for considering the effects of climate change on worker safety and health. Journal of occupational and environmental hygiene, 2016, 13.11: 847-865e

[7] Vincenzo Molinaro, Andrea Bogi, Portale Agenti Fisici. "Microclima: descrizione del rischio." https://www.portaleagentifisici.it/fo_microclima_index.php?lg=IT. [Accesso: 18 Giugno 2025].

[8] Lavorofacile. "Esposizione al calore sul lavoro: quali sono gli effetti e come proteggere i lavoratori." [01 Giugno 2023]. https://www.lavorofacile.it/news/esposizione-al-calore-sul-lavoro--quali-sono-gli-effetti-e-come-proteggere-i-lavoratori. [Accesso: 18 Febbraio 2025].

[9] Bourbonnais, R., J. Zayed, M. Levesque, M.-A. Busque, P. Duguay, and G. Truchon: Identification of workers exposed concomitantly to heat stress and chemicals. Ind. Health 51(1):25–33 (2013)

[10] Ministero del Lavoro e delle Politiche Sociali. "Malattia Professionale." https://www.lavoro.gov.it/temi-e-priorita/previdenza/focus-on/assicurazione-contro-infortuni-sul-lavoro-e-malattie-professionali/pagine/malattia-professionale. [Accesso 18 Gennaio 2025]

[11] Wired. "Geoingeniería solar: alterar la atmósfera para enfriar el planeta, el tema tabú que la ONU debe tocar." [22 Febbraio 2024]. https://es.wired.com/articulos/geoingenieria-solar-alterar-la-atmosfera-para-enfriar-el-planeta-el-tema-tabu-que-la-onu-debe-tocar. [Accesso: 18 Gennaio 2025].

[12] DEL GAUDIO, M., et al. La valutazione del Microclima. INAIL: Milan, Italy, 2018.

[13] Antonio Griguolo. "Organi interni: cosa e quali sono? Suddivisione e organi vitali." [12 Marzo 2020]. https://www.my-personaltrainer.it/salute-benessere/organi-interni.htm. [Accesso: 10 Febbraio 2025].

[14] Wikipedia. "Termocettori.". https://it.wikipedia.org/wiki/Termocettori. [Accesso: 12 Febbraio 2025].

[15] OLESEN, Bjarne W. Thermal comfort. Bruel & Kjaer, 1982.

[16] Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n. 81, "Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro"

[17] Vincenzo Molinaro, Andrea Bogi, Portale Agenti Fisici. " FAQ MICROCLIMA - D.7 Quali criteri per gestire l'acclimatamento?". https://www.portaleagentifisici.it/faq_viewer_microclima.php?id=94. [Accesso: 14 Febbraio 2025].

[18] ISO, E. N. EN ISO 7730. Ergonomics of the thermal environment – analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, 2005;

[19] Vincenzo Molinaro, Andrea Bogi, Portale Agenti Fisici. Portale Agenti Fisici. " FAQ MICROCLIMA - B.3 Come si effettua la stima dell'attività metabolica?". https://www.portaleagentifisici.it/faq_viewer_microclima.php?id=60. [Accesso: 20 Febbraio 2025].

[20] ISO, E. N. EN ISO 8996. Ergonomics of the thermal environment – Determination of the metabolic rate, 2021;

[21] Vincenzo Molinaro, Andrea Bogi, Portale Agenti Fisici. "Metodiche di valutazione del rischio - Microclima.". https://www.portaleagentifisici.it/fo_microclima_metodiche.php?lg=IT. [Accesso: 23 Febbraio 2025].

[22] Vincenzo Molinaro, Andrea Bogi, Portale Agenti Fisici. "Prevenzione e protezione - Microclima." https://www.portaleagentifisici.it/fo_microclima_prevenszione_e_protezione.php?lg=IT. [Accesso: 23 Febbraio 2025].

[23] DEL GAUDIO, M. The correct evaluation of the microclimate for an ergonomic and safe workplace. Igiene e Sanità Pubblica, 2021, 77.1.

[24] Pietro Nataletti, Portale Agenti Fisici. "Alla luce del D.Lgs. 81/2008 come deve essere strutturato il documento di valutazione del rischio di un agente fisico e quali elementi deve contenere la relazione tecnica?". https://www.portaleagentifisici.it/faq.php?id=142. [Accesso: 3 Marzo 2025].

[25] ISO, E. N. EN ISO 9920. Ergonomics of the thermal environment – Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of clothing ensemble, 2008;

[26] Eurotherm. "Comfort termico: da una percezione soggettiva a uno standard condiviso.". https://www.eurotherm.info/it/it/comfort-radiante/comfort-termico. [Accesso: 24 Aprile luglio 2025].

[27] ANDERSON, G. Brooke; BELL, Michelle L.; PENG, Roger D. Methods to calculate the heat index as an exposure metric in environmental health research. Environmental health perspectives, 2013, 121.10: 1111-1119.

[28] Steadman, R. G. (July 1979). "The Assessment of Sultriness. Part I: A Temperature-Humidity Index Based on Human Physiology and Clothing Science". Journal of Applied Meteorology. 18 (7): 861–873.

[29] Steadman, R. G. (July 1979). "The Assessment of Sultriness. Part II: Effects of Wind, Extra Radiation and Barometric Pressure on Apparent Temperature". Journal of Applied Meteorology. 18 (7): 874–885.

[30] National Oceanic and Atmospheric Administration. "Heat Index." [20 Settembre 2023]. https://www.noaa.gov/jetstream/synoptic/heat-index. [Accesso: 22 Marzo 2025].

[31] National Oceanic and Atmospheric Administration. "Heat Index Calculation.". https://www.wpc.ncep.noaa.gov/html/heatindex.shtml. [Accesso: 22 Marzo 2025].

[32] Portale Agenti Fisici. "Calcolatore Indice di Calore (Heat Index)". https://www.portaleagentifisici.it/c.php?lg=IT&id=925. [Accesso: 22 Marzo 2025].

[33] ROTHFUSZ, Lans P. The heat index equation (or, more than you ever wanted to know about heat index). 1990.

[34] Wikipedia. "Heat index.". https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_index. [Accesso: 22 Marzo 2025].

[35] ISO, E. N. EN ISO 7243, Ergonomics of the thermal environment – Assessment of heat stress using the WBGT (wet bulb globe temperature) index, 2017;

[36] ISO, E. N. EN ISO 7933, Ergonomics of the thermal environment – Analytic determination and interpretation of the heat stress using calculation of the predicted heat strain, 2023;

[37] PARSONS, Ken. Heat stress standard ISO 7243 and its global application. Industrial health, 2006, 44.3: 368-379.

[38] ISO, E. N. EN ISO 11079, Ergonomics of the thermal environment – Determination and interpretation of cold stress when using required clothing insulation (IREQ) and local cooling effects, 2007;

[39] D'AMBROSIO, Francesca Romana, et al. LA VALUTAZIONE DEGLI AMBIENTI FREDDI TERMICAMENTE SEVERI. LAVORO SICURO, 2003, 4: 50-59.

[40] Chuansi Gao. " CALCULATION OF REQUIRED CLOTHING INSULATION (IREQ), DURATION LIMITED EXPOSURE (Dlim), REQUIRED RECOVERY TIME (RT), and Wind Chill Temperature (twc)". https://www.eat.lth.se/fileadmin/eat/Termisk_miljoe/IREQ2009ver4_2.html. [Accesso: 18 Marzo 2025].

[41] ISO, E. N. EN ISO 13732-3, Ergonomia degli ambienti termici – Metodi per la valutazione della riposta dell'uomo al contatto on le superfici – Parte 3: Superfici fredde, 2009

[42] DA SILVA, Manuel Carlos Gameiro. Spreadsheets for the calculation of thermal comfort indices. Scribd, 2013.

[43] ISO, E. N. EN ISO 7726. Ergonomics of the thermal environment – Instruments for measuring physical quantities, 2002;

[44] DEL GAUDIO, Michele. IL GIUSTO APPROCCIO ALLA VALUTAZIONE DEL RISCHIO MICROCLIMA NEGLI AMBIENTI DI LAVORO. QUARTA RACCOLTA, 109.

[45] Vincenzo Molinaro, Andrea Bogi, Portale Agenti Fisici. "FAQ MICROCLIMA - B.8 Quale deve essere la posizione delle sonde in una postazione di misura?", https://www.portaleagentifisici.it/faq_viewer_microclima.php?id=65, [Accesso 6 Aprile 2025]

[46] Tecnosoft. "Cos'è il tempo di risposta". https://www.tecnosoft.eu/it/faq/significato-tempo-di-risposta [Accesso: 8 Aprile 2025].

[47] Wikipedia. "Temperatura di bulbo umido". https://it.wikipedia.org/wiki/Temperatura_di_bulbo_umido. [Accesso 23 Aprile 2025]

[48] OĞULATA, R. Tuğrul. The effect of thermal insulation of clothing on human thermal comfort. Fibres & Textiles in Eastern Europe, 2007, 15.2: 61.

[49] BEVILACQUA, R.; PICCIONI, R. CONOSCERE IL RISCHIO, Il bilancio termico dell'organismo ed i parametri soggettivi, 2022

[50] HOLMÉR, Ingvar. Thermal manikin history and applications. European journal of applied physiology, 2004, 92.6: 614-618.

[51] CERVANTES, MacKenzie K.; BROSS, Rachelle. Energy metabolism and requirements in chronic kidney disease. In: Nutritional Management of Renal Disease. Academic Press, 2022. p. 61-75.

[52] Guinguette Marais Poitevin. "I 13 gruppi muscolari principali del corpo e le loro funzioni". https://guinguette-maraispoitevin.com/it/i-13-gruppi-muscolari-principali-del-corpo-e-le-loro-funzioni/. [Accesso 2 Maggio 2025]

[53] MALCHAIRE, Jacques; ALFANO, Francesca Romana d'Ambrosio; PALELLA, Boris Igor. Evaluation of the metabolic rate based on the recording of the heart rate. Industrial health, 2017, 55.3: 219-232.;

[54] YAO, Runming, et al. A 'heart rate'-based model (PHSHR) for predicting personal heat stress in dynamic working environments. Building and Environment, 2018, 135: 318-329.

[55] Wikipedia. "Acqua doppiamente marcata". https://it.wikipedia.org/wiki/Acqua_doppiamente_marcata. [Accesso 4 Maggio 2025]

[56] KIM, Sunyoung; KIM, Eunae; PARK, Youngmi. Thermal insulation and morphology of natural and synthetic filled outdoor sportswear by repeated water washing and dry cleaning. International Journal of Clothing Science and Technology, 2018, 30.3: 428-443.

ALLEGATI

ALLEGATO 1 - SCHEDE DI MISURA CAPITOLO 4 – *Paragr*afo 4.1 ..... **113**

ALLEGATO 2 - SCHEDE DI MISURA CAPITOLO 4 – *Paragrafo 4.2* **119**

ALLEGATO 3 - SCHEDE DI MISURA CAPITOLO 5 – *Paragrafo 5.2.1* **123**

ALLEGATO 4 - SCHEDE DI MISURA CAPITOLO 5 – *Paragrafo 5.2.2* **127**

ALLEGATO 1

SCHEDE DI MISURA CAPITOLO 4 – *Paragrafo 4.1*

Ambiente Moderabile - Ufficio

CALCOLO DEGLI INDICI MICROCLIMATICI	ID MISURA	1

Tipologia d'ambiente			UFFICIO AL PIANO TERRA
Parametro soggetto	**Parametro soggetto 1**		
Parametro	Valore	Unit.Misura	
Resistenza termica vestiario Icl	0,6	clo	
Area di superficie corporea Adu	1,80	m_2	
Energia termica metabolica attività M	70	W/m_2	

Dati Ambientali Acquisiti - ID Misura 1: UFFICIO AL PIANO TERRA				
Indicatore	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std**
Temp. bulbo umido Tw [°C]	20,9	20,7	20,8	0,1
Temp. globotermometro Tg [°C]	25,1	25	25,1	0,0
Temp. aria Ta [°C]	25,3	25,2	25,2	0,0
Umidità relativa RH [%]	57,7	57,5	57,6	0,1
Velocità dell'aria [m/s]	0,01	0,00	0,00	0,0
Pressione atmosferica Pr [hPa]	1011,0	1011,0	1011,0	0,0
Temperatura radiante [°C]	25,1	25	25,1	0,1

Indici di comfort/discomfort termico (UNI EN ISO 7730)				
Indicatori benessere termico	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std.**
Voto medio previsto PMV [-]	0,35	0,31	0,33	0,0
Percentuale insoddisfatti PPD [%]	7,6	7,0	7,2	0,2
Voto medio previsto PMV [-]			0,33	
Percentuale insoddisfatti PPD [%]			7,2	

Indice di stress termico WBGT (UNI EN ISO 7243)				
Indicatori stress termico WBGT	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std.**
WBGT-indoor [°C]	22,1	22,0	22,1	0,0
WBGT-outdoor [°C]	22,2	22,0	22,1	0,1
Ambiente indoor o outdoor?			Interno	
WBGT eff [°C]			n.a.	
WBGT limite acclimatato [°C]			n.a.	
WBGT limite non acclimatato [°C]			n.a.	
La persona è acclimatata?			Si	
Il WBGT effettivo supera il WBGT limite di riferimento?			n.a.	

Indice di stress termico PHS (UNI EN ISO 7933)		
Indicatori stress termico PHS	Valore	
Il soggetto è acclimatato?	Si	
Il soggetto può bere liberamente di bere?	Si	
In quale posizione lavora la persona?	Seduta	
La velocità di camminamento è nota?	No	-
La direzione di camminamento è nota?	No	-
La persona è esposta all'ambiente severo caldo per tutta la giornata lavorativa?	No	
Per quanti minuti [min] è esposte all'ambiente severo caldo?	480	
La persona indossa un abbigliamento riflettente?	No	
Calcolo perdità di liquidi, temperatura rettale e relativi tempi limite		
Water Loss al termine dell'esposizione [g]		n.a.
Dlimloss95 [min]		n.a.
Temperatura rettale al termine dell'esposizione [°C]		n.a.
Dlimtrer [min]		n.a.
DLE tempo limite esposizione [min]		n.a.
Il tempo limite di d'esposizione viene superato?	n.a.	

CALCOLO DEGLI INDICI MICROCLIMATICI	ID MISURA	2

Tipologia d'ambiente			UFFICIO AL PRIMO PIANO
Parametro soggetto	**Parametro soggetto 1**		
Parametro	Valore	Unit.Misura	
Resistenza termica vestiario Icl	0,6	clo	
Area di superficie corporea A_{du}	1,80	m_2	
Energia termica metabolica attività M	70	W/m_2	

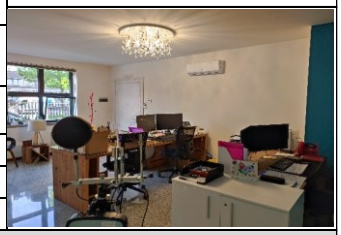
Dati Ambientali Acquisiti - ID Misura 2: UFFICIO AL PRIMO PIANO				
Indicatore	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std**
Temp. bulbo umido Tw [°C]	22,8	22,6	22,7	0,1
Temp. globotermometro Tg [°C]	25,8	25,7	25,7	0,0
Temp. aria Ta [°C]	25,8	25,7	25,8	0,0
Umidità relativa RH [%]	57,9	57,3	57,6	0,2
Velocità dell'aria [m/s]	0,05	0,00	0,02	0,0
Pressione atmosferica Pr [hPa]	1012,2	1012,1	1012,2	0,0
Temperatura radiante [°C]	25,8	25,7	25,7	0,0

Indici di comfort/discomfort termico (UNI EN ISO 7730)				
Indicatori benessere termico	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std.**
Voto medio previsto PMV [-]	0,52	0,49	0,50	0,0
Percentuale insoddisfatti PPD [%]	10,7	10,0	10,2	0,3
Voto medio previsto PMV [-]			0,50	
Percentuale insoddisfatti PPD [%]			10,3	

Indice di stress termico WBGT (UNI EN ISO 7243)				
Indicatori stress termico WBGT	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std.**
WBGT-indoor [°C]	23,7	23,5	23,6	0,1
WBGT-outdoor [°C]	23,7	23,5	23,6	0,1
Ambiente indoor o outdoor?			Interno	
WBGT eff [°C]			n.a.	
WBGT limite acclimatato [°C]			n.a.	
WBGT limite non acclimatato [°C]			n.a.	
La persona è acclimatata?			Si	
Il WBGT effettivo supera il WBGT limite di riferimento?			n.a.	

Indice di stress termico PHS (UNI EN ISO 7933)		
Indicatori stress termico PHS	Valore	
Il soggetto è acclimatato?	Si	
Il soggetto può bere liberamente di bere?	Si	
In quale posizione lavora la persona?	Seduta	
La velocità di camminamento è nota?	No	-
La direzione di camminamento è nota?	No	-
La persona è esposta all'ambiente severo caldo per tutta la giornata lavorativa?	No	
Per quanti minuti [min] è esposte all'ambiente severo caldo?	480	
La persona indossa un abbigliamento riflettente?	No	
Calcolo perdità di liquidi, temperatura rettale e relativi tempi limite		
Water Loss al termine dell'esposizione [g]		n.a.
$D_{limloss95}$ [min]		n.a.
Temperatura rettale al termine dell'esposizione [°C]		n.a.
$D_{limtrer}$ [min]		n.a.
DLE tempo limite esposizione [min]		n.a.
Il tempo limite di d'esposizione viene superato?	n.a.	

CALCOLO DEGLI INDICI MICROCLIMATICI	ID MISURA	3

Tipologia d'ambiente			RECEPTION
Parametro soggetto	**Parametro soggetto 1**		
Parametro	Valore	Unit.Misura	
Resistenza termica vestiario Icl	0,6	clo	
Area di superficie corporea A_{du}	1,80	m_2	
Energia termica metabolica attività M	70	W/m_2	

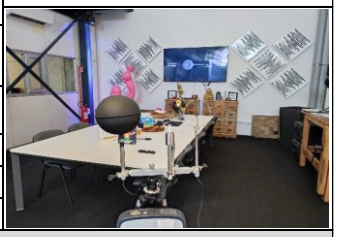
Dati Ambientali Acquisiti - ID Misura 3: RECEPTION				
Indicatore	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std**
Temp. bulbo umido Tw [°C]	20,9	20,3	20,4	0,2
Temp. globotermometro Tg [°C]	25,2	25,1	25,1	0,0
Temp. aria Ta [°C]	25,3	24,9	24,9	0,1
Umidità relativa RH [%]	59,2	57,7	59,0	0,4
Velocità dell'aria [m/s]	0,08	0,00	0,06	0,0
Pressione atmosferica Pr [hPa]	1011,9	1011,0	1011,8	0,2
Temperatura radiante [°C]	25,3	25,1	25,2	0,1

Indici di comfort/discomfort termico (UNI EN ISO 7730)				
Indicatori benessere termico	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std.**
Voto medio previsto PMV [-]	0,35	0,30	0,32	0,0
Percentuale insoddisfatti PPD [%]	7,6	6,9	7,1	0,2
Voto medio previsto PMV [-]			0,32	
Percentuale insoddisfatti PPD [%]			7,1	

Indice di stress termico WBGT (UNI EN ISO 7243)				
Indicatori stress termico WBGT	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std.**
WBGT-indoor [°C]	22,1	21,8	21,8	0,1
WBGT-outdoor [°C]	22,2	21,7	21,8	0,1
Ambiente indoor o outdoor?			Interno	
WBGT eff [°C]			n.a.	
WBGT limite acclimatato [°C]			n.a.	
WBGT limite non acclimatato [°C]			n.a.	
La persona è acclimatata?			Si	
Il WBGT effettivo supera il WBGT limite di riferimento?			n.a.	

Indice di stress termico PHS (UNI EN ISO 7933)		
Indicatori stress termico PHS	Valore	
Il soggetto è acclimatato?	Si	
Il soggetto può bere liberamente di bere?	Si	
In quale posizione lavora la persona?	Seduta	
La velocità di camminamento è nota?	No	-
La direzione di camminamento è nota?	No	-
La persona è esposta all'ambiente severo caldo per tutta la giornata lavorativa?	No	
Per quanti minuti [min] è esposte all'ambiente severo caldo?	480	
La persona indossa un abbigliamento riflettente?	No	
Calcolo perdità di liquidi, temperatura rettale e relativi tempi limite		
Water Loss al termine dell'esposizione [g]		n.a.
$D_{limloss95}$ [min]		n.a.
Temperatura rettale al termine dell'esposizione [°C]		n.a.
$D_{limtrer}$ [min]		n.a.
DLE tempo limite esposizione [min]		n.a.
Il tempo limite di d'esposizione viene superato?	n.a.	

CALCOLO DEGLI INDICI MICROCLIMATICI	ID MISURA	4

Tipologia d'ambiente			SALA RIUNIONI
Parametro soggetto	**Parametro soggetto 2**		
Parametro	Valore	Unit.Misura	
Resistenza termica vestiario Icl	0,6	clo	
Area di superficie corporea A_{du}	1,80	m_2	
Energia termica metabolica attività M	70	W/m_2	

Dati Ambientali Acquisiti - ID Misura 4: SALA RIUNIONI				
Indicatore	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std**
Temp. bulbo umido Tw [°C]	22,2	22,1	22,2	0,0
Temp. globotermometro Tg [°C]	25,1	25	25,0	0,0
Temp. aria Ta [°C]	25,1	25,1	25,1	0,0
Umidità relativa RH [%]	57,3	57,0	57,1	0,1
Velocità dell'aria [m/s]	0,10	0,00	0,03	0,0
Pressione atmosferica Pr [hPa]	1011,8	1011,8	1011,8	0,0
Temperatura radiante [°C]	25,1	24,9	25,0	0,1

Indici di comfort/discomfort termico (UNI EN ISO 7730)				
Indicatori benessere termico	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std.**
Voto medio previsto PMV [-]	0,31	0,29	0,30	0,0
Percentuale insoddisfatti PPD [%]	7,0	6,8	6,9	0,1
Voto medio previsto PMV [-]			0,30	
Percentuale insoddisfatti PPD [%]			6,9	

Indice di stress termico WBGT (UNI EN ISO 7243)				
Indicatori stress termico WBGT	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std.**
WBGT-indoor [°C]	23,1	23,0	23,0	0,0
WBGT-outdoor [°C]	23,1	23,0	23,0	0,0
Ambiente indoor o outdoor?			Interno	
WBGT eff [°C]			n.a.	
WBGT limite acclimatato [°C]			n.a.	
WBGT limite non acclimatato [°C]			n.a.	
La persona è acclimatata?			Si	
Il WBGT effettivo supera il WBGT limite di riferimento?			n.a.	

Indice di stress termico PHS (UNI EN ISO 7933)		
Indicatori stress termico PHS	Valore	
Il soggetto è acclimatato?	Si	
Il soggetto può bere liberamente di bere?	Si	
In quale posizione lavora la persona?	Seduta	
La velocità di camminamento è nota?	No	-
La direzione di camminamento è nota?	No	-
La persona è esposta all'ambiente severo caldo per tutta la giornata lavorativa?	No	
Per quanti minuti [min] è esposte all'ambiente severo caldo?	480	
La persona indossa un abbigliamento riflettente?	-	
Calcolo perdità di liquidi, temperatura rettale e relativi tempi limite		
Water Loss al termine dell'esposizione [g]		n.a.
$D_{limloss95}$ [min]		n.a.
Temperatura rettale al termine dell'esposizione [°C]		n.a.
$D_{limtrer}$ [min]		n.a.
DLE tempo limite esposizione [min]		n.a.
Il tempo limite di d'esposizione viene superato?	n.a.	

ALLEGATO 2

SCHEDE DI MISURA CAPITOLO 4 – *Paragrafo 4.2*

Ambiente Severo caldo indoor – Vetreria Industriale

CALCOLO DEGLI INDICI MICROCLIMATICI	ID MISURA	1

Tipologia d'ambiente			AREA DI SCOVOLATURA
Parametro soggetto	**Parametro soggetto 1**		
Parametro	Valore	Unit.Misura	
Resistenza termica vestiario Icl	1,05	clo	
Area di superficie corporea A_{du}	1,80	m_2	
Energia termica metabolica attività M	100	W/m_2	

Dati Ambientali Acquisiti - ID Misura 1: AREA DI SCOVOLATURA				
Indicatore	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std**
Temp. bulbo umido Tw [°C]	27	26,5	26,7	0,1
Temp. globotermometro Tg [°C]	47,4	47,1	47,2	0,1
Temp. aria Ta [°C]	42,4	42,0	42,1	0,1
Umidità relativa RH [%]	32,4	30,9	31,8	0,4
Velocità dell'aria [m/s]	1,58	0,62	1,05	0,3
Pressione atmosferica Pr [hPa]	1000,3	1000,2	1000,3	0,0
Temperatura radiante [°C]	59,6	54,1	56,7	1,6

Indici di comfort/discomfort termico (UNI EN ISO 7730)				
Indicatori benessere termico	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std.**
Voto medio previsto PMV [-]	5,07	4,81	4,93	0,1
Percentuale insoddisfatti PPD [%]	100,0	100,0	100,0	0,0
Voto medio previsto PMV [-]			4,93	
Percentuale insoddisfatti PPD [%]			100,0	

Indice di stress termico WBGT (UNI EN ISO 7243)				
Indicatori stress termico WBGT	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std.**
WBGT-indoor [°C]	33,0	32,7	32,9	0,1
WBGT-outdoor [°C]	32,5	32,2	32,4	0,1
Ambiente indoor o outdoor?			Interno	
WBGT eff [°C]			32,9	
WBGT limite acclimatato [°C]			30,8	
WBGT limite non acclimatato [°C]			28,1	
La persona è acclimatata?			Si	
Il WBGT effettivo supera il WBGT limite di riferimento?			Si	

Indice di stress termico PHS (UNI EN ISO 7933)		
Indicatori stress termico PHS	Valore	
Il soggetto è acclimatato?	Si	
Il soggetto può bere liberamente di bere?	Si	
In quale posizione lavora la persona?	In piedi	
La velocità di camminamento è nota?	No	-
La direzione di camminamento è nota?	No	-
La persona è esposta all'ambiente severo caldo per tutta la giornata lavorativa?	No	
Per quanti minuti [min] è esposte all'ambiente severo caldo?	210	
La persona indossa un abbigliamento riflettente?	No	
Calcolo perdità di liquidi, temperatura rettale e relativi tempi limite		
Water Loss al termine dell'esposizione [g]		2209,5
$D_{limloss95}$ [min]		325
Temperatura rettale al termine dell'esposizione [°C]		37,3
$D_{limtrer}$ [min]		480
DLE tempo limite esposizione [min]		325
Il tempo limite di d'esposizione viene superato?	No	

CALCOLO DEGLI INDICI MICROCLIMATICI	ID MISURA	2

Tipologia d'ambiente			POSTAZIONE DI TAKE OUT
Parametro soggetto	**Parametro soggetto 1**		
Parametro	Valore	Unit.Misura	
Resistenza termica vestiario Icl	1,05	clo	
Area di superficie corporea A_{du}	1,80	m_2	
Energia termica metabolica attività M	100	W/m_2	

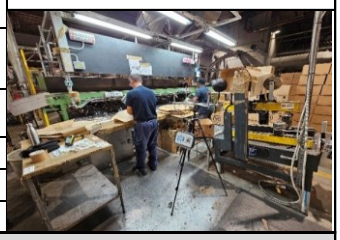
Dati Ambientali Acquisiti - ID Misura 2: POSTAZIONE DI TAKE OUT				
Indicatore	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std**
Temp. bulbo umido Tw [°C]	29,5	28,4	28,9	0,3
Temp. globotermometro Tg [°C]	50,5	50,1	50,3	0,1
Temp. aria Ta [°C]	46,6	46,0	46,1	0,2
Umidità relativa RH [%]	26,2	24,9	25,7	0,3
Velocità dell'aria [m/s]	1,86	0,72	1,34	0,3
Pressione atmosferica Pr [hPa]	1000,0	1000,0	1000,0	0,0
Temperatura radiante [°C]	61,2	56,3	58,9	1,3

Indici di comfort/discomfort termico (UNI EN ISO 7730)				
Indicatori benessere termico	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std.**
Voto medio previsto PMV [-]	5,67	5,39	5,56	0,1
Percentuale insoddisfatti PPD [%]	100,0	100,0	100,0	0,0
Voto medio previsto PMV [-]			5,56	
Percentuale insoddisfatti PPD [%]			100,0	

Indice di stress termico WBGT (UNI EN ISO 7243)				
Indicatori stress termico WBGT	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std.**
WBGT-indoor [°C]	35,8	34,9	35,3	0,3
WBGT-outdoor [°C]	35,3	34,5	34,9	0,3
Ambiente indoor o outdoor?			Interno	
WBGT eff [°C]			35,3	
WBGT limite acclimatato [°C]			30,8	
WBGT limite non acclimatato [°C]			28,1	
La persona è acclimatata?			Si	
Il WBGT effettivo supera il WBGT limite di riferimento?			Si	

Indice di stress termico PHS (UNI EN ISO 7933)		
Indicatori stress termico PHS	Valore	
Il soggetto è acclimatato?	Si	
Il soggetto può bere liberamente di bere?	Si	
In quale posizione lavora la persona?	In piedi	
La velocità di camminamento è nota?	No	-
La direzione di camminamento è nota?	No	-
La persona è esposta all'ambiente severo caldo per tutta la giornata lavorativa?	No	
Per quanti minuti [min] è esposte all'ambiente severo caldo?	15	
La persona indossa un abbigliamento riflettente?	No	
Calcolo perdità di liquidi, temperatura rettale e relativi tempi limite		
Water Loss al termine dell'esposizione [g]		85,3
$D_{limloss95}$ [min]		296
Temperatura rettale al termine dell'esposizione [°C]		37,2
$D_{limtrer}$ [min]		480
DLE tempo limite esposizione [min]		296
Il tempo limite di d'esposizione viene superato?	No	

CALCOLO DEGLI INDICI MICROCLIMATICI	ID MISURA	3

Tipologia d'ambiente			AREA DI COLLAUDO
Parametro soggetto	**Parametro soggetto 2**		
Parametro	Valore	Unit.Misura	
Resistenza termica vestiario Icl	0,7	clo	
Area di superficie corporea A_{du}	1,80	m_2	
Energia termica metabolica attività M	100	W/m_2	

Dati Ambientali Acquisiti - ID Misura 3: AREA DI COLLAUDO				
Indicatore	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std**
Temp. bulbo umido Tw [°C]	24,6	24,5	24,5	0,0
Temp. globotermometro Tg [°C]	34	33,8	33,9	0,1
Temp. aria Ta [°C]	33,3	33,1	33,2	0,1
Umidità relativa RH [%]	48,9	48,2	48,6	0,2
Velocità dell'aria [m/s]	1,11	0,52	0,73	0,2
Pressione atmosferica Pr [hPa]	999,2	999,2	999,2	0,0
Temperatura radiante [°C]	35,6	34,7	35,1	0,3

Indici di comfort/discomfort termico (UNI EN ISO 7730)				
Indicatori benessere termico	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std.**
Voto medio previsto PMV [-]	2,72	2,67	2,69	0,1
Percentuale insoddisfatti PPD [%]	97,0	96,3	96,6	0,2
Voto medio previsto PMV [-]			2,69	
Percentuale insoddisfatti PPD [%]			96,6	

Indice di stress termico WBGT (UNI EN ISO 7243)				
Indicatori stress termico WBGT	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std.**
WBGT-indoor [°C]	27,4	27,3	27,4	0,1
WBGT-outdoor [°C]	27,3	27,2	27,3	0,1
Ambiente indoor o outdoor?			Interno	
WBGT eff [°C]			27,4	
WBGT limite acclimatato [°C]			30,8	
WBGT limite non acclimatato [°C]			28,1	
La persona è acclimatata?			Si	
Il WBGT effettivo supera il WBGT limite di riferimento?			No	

Indice di stress termico PHS (UNI EN ISO 7933)		
Indicatori stress termico PHS	Valore	
Il soggetto è acclimatato?	Si	
Il soggetto può bere liberamente di bere?	Si	
In quale posizione lavora la persona?	In piedi	
La velocità di camminamento è nota?	No	-
La direzione di camminamento è nota?	No	-
La persona è esposta all'ambiente severo caldo per tutta la giornata lavorativa?	No	
Per quanti minuti [min] è esposte all'ambiente severo caldo?	480	
La persona indossa un abbigliamento riflettente?	No	
Calcolo perdità di liquidi, temperatura rettale e relativi tempi limite		
Water Loss al termine dell'esposizione [g]		2289,1
$D_{limloss95}$ [min]		480
Temperatura rettale al termine dell'esposizione [°C]		37,3
$D_{limtrer}$ [min]		480
DLE tempo limite esposizione [min]		480
Il tempo limite di d'esposizione viene superato?	No	

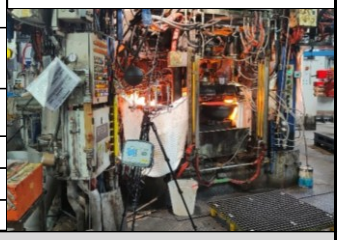
ALLEGATO 3

SCHEDE DI MISURA CAPITOLO 5 – *Paragrafo 5.2.1*

Ambiente Severo caldo indoor – Vetreria Industriale

Valutazione degli indici microclimatici condotta adottando il metodo di analisi del metabolismo energetico di Livello 1 - Controllo

CALCOLO DEGLI INDICI MICROCLIMATICI	ID MISURA	1.1*

Tipologia d'ambiente			AREA DI SCOVOLATURA
Parametro soggetto	**Parametro soggetto 1**		
Parametro	Valore	Unit.Misura	
Resistenza termica vestiario Icl	1,05	clo	
Area di superficie corporea Adu	1,80	m_2	
Energia termica metabolica attività M	100	W/m_2	

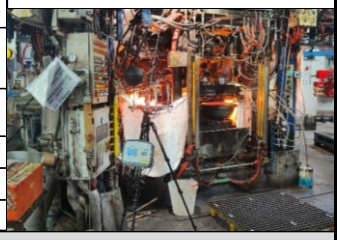
Dati Ambientali Acquisiti - ID Misura 1: AREA DI SCOVOLATURA				
Indicatore	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std**
Temp. bulbo umido Tw [°C]	29,4	29	29,1	0,1
Temp. globotermometro Tg [°C]	46,6	46,5	46,6	0,0
Temp. aria Ta [°C]	46,4	45,7	46,1	0,2
Umidità relativa RH [%]	27,2	25,6	26,2	0,4
Velocità dell'aria [m/s]	1,39	0,56	0,83	0,2
Pressione atmosferica Pr [hPa]	1005,4	1005,4	1005,4	0,0
Temperatura radiante [°C]	48	46,7	47,3	0,4

Indici di comfort/discomfort termico (UNI EN ISO 7730)				
Indicatori benessere termico	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std.**
Voto medio previsto PMV [-]	4,98	4,80	4,88	0,1
Percentuale insoddisfatti PPD [%]	100,0	100,0	100,0	0,0
Voto medio previsto PMV [-]			4,88	
Percentuale insoddisfatti PPD [%]			100,0	

Indice di stress termico WBGT (UNI EN ISO 7243)				
Indicatori stress termico WBGT	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std.**
WBGT-indoor [°C]	34,5	34,3	34,4	0,1
WBGT-outdoor [°C]	34,5	34,2	34,3	0,1
Ambiente indoor o outdoor?			Interno	
WBGT eff [°C]			34,4	
WBGT limite acclimatato [°C]			30,8	
WBGT limite non acclimatato [°C]			28,1	
La persona è acclimatata?			No	
Il WBGT effettivo supera il WBGT limite di riferimento?			Si	

Indice di stress termico PHS (UNI EN ISO 7933)		
Indicatori stress termico PHS	Valore	
Il soggetto è acclimatato?	No	
Il soggetto può bere liberamente di bere?	Si	
In quale posizione lavora la persona?	In piedi	
La velocità di camminamento è nota?	No	-
La direzione di camminamento è nota?	No	-
La persona è esposta all'ambiente severo caldo per tutta la giornata lavorativa?	No	
Per quanti minuti [min] è esposte all'ambiente severo caldo?	60	
La persona indossa un abbigliamento riflettente?	No	
Calcolo perdità di liquidi, temperatura rettale e relativi tempi limite		
Water Loss al termine dell'esposizione [g]		622,4
Dlimloss95 [min]		315
Temperatura rettale al termine dell'esposizione [°C]		37,5
Dlimtrer [min]		143
DLE tempo limite esposizione [min]		143
Il tempo limite di d'esposizione viene superato?	No	

CALCOLO DEGLI INDICI MICROCLIMATICI	ID MISURA	1.2

Tipologia d'ambiente			AREA DI SCOVOLATURA
Parametro soggetto	**Parametro soggetto 1**		
Parametro	Valore	Unit.Misura	
Resistenza termica vestiario Icl	1,05	clo	
Area di superficie corporea Adu	1,80	m_2	
Energia termica metabolica attività M	100	W/m_2	

Dati Ambientali Acquisiti - ID Misura 1: AREA DI SCOVOLATURA				
Indicatore	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std**
Temp. bulbo umido Tw [°C]	29,4	29	29,1	0,1
Temp. globotermometro Tg [°C]	46,6	46,5	46,6	0,0
Temp. aria Ta [°C]	46,4	45,7	46,1	0,2
Umidità relativa RH [%]	27,2	25,6	26,2	0,4
Velocità dell'aria [m/s]	1,39	0,56	0,83	0,2
Pressione atmosferica Pr [hPa]	1005,4	1005,4	1005,4	0,0
Temperatura radiante [°C]	48	46,7	47,3	0,4

Indici di comfort/discomfort termico (UNI EN ISO 7730)				
Indicatori benessere termico	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std.**
Voto medio previsto PMV [-]	4,98	4,80	4,88	0,1
Percentuale insoddisfatti PPD [%]	100,0	100,0	100,0	0,0
Voto medio previsto PMV [-]			4,88	
Percentuale insoddisfatti PPD [%]			100,0	

Indice di stress termico WBGT (UNI EN ISO 7243)				
Indicatori stress termico WBGT	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std.**
WBGT-indoor [°C]	34,5	34,3	34,4	0,1
WBGT-outdoor [°C]	34,5	34,2	34,3	0,1
Ambiente indoor o outdoor?			Interno	
WBGT eff [°C]			34,4	
WBGT limite acclimatato [°C]			30,8	
WBGT limite non acclimatato [°C]			28,1	
La persona è acclimatata?			Si	
Il WBGT effettivo supera il WBGT limite di riferimento?			Si	

Indice di stress termico PHS (UNI EN ISO 7933)		
Indicatori stress termico PHS	Valore	
Il soggetto è acclimatato?	Si	
Il soggetto può bere liberamente di bere?	Si	
In quale posizione lavora la persona?	In piedi	
La velocità di camminamento è nota?	No	-
La direzione di camminamento è nota?	No	-
La persona è esposta all'ambiente severo caldo per tutta la giornata lavorativa?	No	
Per quanti minuti [min] è esposte all'ambiente severo caldo?	210	
La persona indossa un abbigliamento riflettente?	No	
Calcolo perdità di liquidi, temperatura rettale e relativi tempi limite		
Water Loss al termine dell'esposizione [g]		2563,7
$D_{limloss95}$ [min]		282
Temperatura rettale al termine dell'esposizione [°C]		37,3
$D_{limtrer}$ [min]		480
DLE tempo limite esposizione [min]		282
Il tempo limite di d'esposizione viene superato?	No	

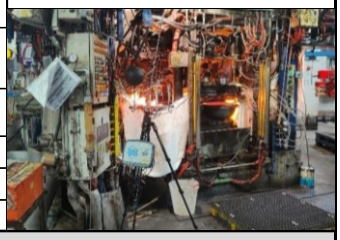
ALLEGATO 4

SCHEDE DI MISURA CAPITOLO 5 – *Paragrafo 5.2.2*

Ambiente Severo caldo indoor – Vetreria Industriale

Valutazione degli indici microclimatici condotta adottando il metodo di analisi del metabolismo energetico di Livello 3.A - Analisi - Misurazione della frequenza cardiaca in condizioni definite

CALCOLO DEGLI INDICI MICROCLIMATICI	ID MISURA	1.1*

Tipologia d'ambiente			AREA DI SCOVOLATURA
Parametro soggetto	**Parametro soggetto 1.1**		
Parametro	Valore	Unit.Misura	
Resistenza termica vestiario Icl	1,05	clo	
Area di superficie corporea Adu	1,78	m_2	
Energia termica metabolica attività M	134,2	W/m_2	

Dati Ambientali Acquisiti - ID Misura 1.1: AREA DI SCOVOLATURA				
Indicatore	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std**
Temp. bulbo umido Tw [°C]	29,4	29	29,1	0,1
Temp. globotermometro Tg [°C]	46,6	46,5	46,6	0,0
Temp. aria Ta [°C]	46,4	45,7	46,1	0,2
Umidità relativa RH [%]	27,2	25,6	26,2	0,4
Velocità dell'aria [m/s]	1,39	0,56	0,83	0,2
Pressione atmosferica Pr [hPa]	1005,4	1005,4	1005,4	0,0
Temperatura radiante [°C]	48	46,7	47,3	0,4

Indici di comfort/discomfort termico (UNI EN ISO 7730)				
Indicatori benessere termico	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std.**
Voto medio previsto PMV [-]	4,90	4,74	4,81	0,0
Percentuale insoddisfatti PPD [%]	100,00	100,00	100,00	0,0
Voto medio previsto PMV [-]			4,81	
Percentuale insoddisfatti PPD [%]			100,0	

Indice di stress termico WBGT (UNI EN ISO 7243)				
Indicatori stress termico WBGT	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std.**
WBGT-indoor [°C]	34,5	34,3	34,4	0,1
WBGT-outdoor [°C]	34,5	34,2	34,3	0,1
Ambiente indoor o outdoor?			Interno	
WBGT eff [°C]			34,4	
WBGT limite acclimatato [°C]			29,4	
WBGT limite non acclimatato [°C]			26,4	
La persona è acclimatata?			No	
Il WBGT effettivo supera il WBGT limite di riferimento?			Si	

Indice di stress termico PHS (UNI EN ISO 7933)		
Indicatori stress termico PHS	Valore	
Il soggetto è acclimatato?	No	
Il soggetto può bere liberamente di bere?	Si	
In quale posizione lavora la persona?	In piedi	
La velocità di camminamento è nota?	No	-
La direzione di camminamento è nota?	No	-
La persona è esposta all'ambiente severo caldo per tutta la giornata lavorativa?	No	
Per quanti minuti [min] è esposte all'ambiente severo caldo?	60	
La persona indossa un abbigliamento riflettente?	No	
Calcolo perdità di liquidi, temperatura rettale e relativi tempi limite		
Water Loss al termine dell'esposizione [g]		578,1
$D_{limloss95}$ [min]		291
Temperatura rettale al termine dell'esposizione [°C]		37,9
$D_{limtrer}$ [min]		67
DLE tempo limite esposizione [min]		67
Il tempo limite di d'esposizione viene superato?	No	

CALCOLO DEGLI INDICI MICROCLIMATICI	ID MISURA	1.2

Tipologia d'ambiente			AREA DI SCOVOLATURA
Parametro soggetto	**Parametro soggetto 1.2**		
Parametro	Valore	Unit.Misura	
Resistenza termica vestiario Icl	1,05	clo	
Area di superficie corporea A_{du}	2,03	m_2	
Energia termica metabolica attività M	129,7	W/m_2	

Dati Ambientali Acquisiti - ID Misura 1.2: AREA DI SCOVOLATURA				
Indicatore	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std**
Temp. bulbo umido Tw [°C]	29,4	29	29,1	0,1
Temp. globotermometro Tg [°C]	46,6	46,5	46,6	0,0
Temp. aria Ta [°C]	46,4	45,7	46,1	0,2
Umidità relativa RH [%]	27,2	25,6	26,2	0,4
Velocità dell'aria [m/s]	1,39	0,56	0,83	0,2
Pressione atmosferica Pr [hPa]	1005,4	1005,4	1005,4	0,0
Temperatura radiante [°C]	48	46,7	47,3	0,4

Indici di comfort/discomfort termico (UNI EN ISO 7730)				
Indicatori benessere termico	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std.**
Voto medio previsto PMV [-]	4,87	4,71	4,78	0,0
Percentuale insoddisfatti PPD [%]	100,00	100,00	100,00	0,0
Voto medio previsto PMV [-]			4,78	
Percentuale insoddisfatti PPD [%]			100,0	

Indice di stress termico WBGT (UNI EN ISO 7243)				
Indicatori stress termico WBGT	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std.**
WBGT-indoor [°C]	34,5	34,3	34,4	0,1
WBGT-outdoor [°C]	34,5	34,2	34,3	0,1
Ambiente indoor o outdoor?			Interno	
WBGT eff [°C]			34,4	
WBGT limite acclimatato [°C]			28,9	
WBGT limite non acclimatato [°C]			25,8	
La persona è acclimatata?			Si	
Il WBGT effettivo supera il WBGT limite di riferimento?			Si	

Indice di stress termico PHS (UNI EN ISO 7933)		
Indicatori stress termico PHS	Valore	
Il soggetto è acclimatato?	Si	
Il soggetto può bere liberamente di bere?	Si	
In quale posizione lavora la persona?	In piedi	
La velocità di camminamento è nota?	No	-
La direzione di camminamento è nota?	No	-
La persona è esposta all'ambiente severo caldo per tutta la giornata lavorativa?	No	
Per quanti minuti [min] è esposte all'ambiente severo caldo?	210	
La persona indossa un abbigliamento riflettente?	No	
Calcolo perdità di liquidi, temperatura rettale e relativi tempi limite		
Water Loss al termine dell'esposizione [g]		3197,4
$D_{limloss95}$ [min]		270
Temperatura rettale al termine dell'esposizione [°C]		37,8
$D_{limtrer}$ [min]		319
DLE tempo limite esposizione [min]		270
Il tempo limite di d'esposizione viene superato?	No	

CALCOLO DEGLI INDICI MICROCLIMATICI	ID MISURA	1.3

Tipologia d'ambiente			AREA DI SCOVOLATURA
Parametro soggetto	**Parametro soggetto 1.3**		
Parametro	Valore	Unit.Misura	
Resistenza termica vestiario Icl	1,05	clo	
Area di superficie corporea A_{du}	1,83	m_2	
Energia termica metabolica attività M	133,0	W/m_2	

Dati Ambientali Acquisiti - ID Misura 1.3: AREA DI SCOVOLATURA				
Indicatore	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std**
Temp. bulbo umido Tw [°C]	29,4	29	29,1	0,1
Temp. globotermometro Tg [°C]	46,6	46,5	46,6	0,0
Temp. aria Ta [°C]	46,4	45,7	46,1	0,2
Umidità relativa RH [%]	27,2	25,6	26,2	0,4
Velocità dell'aria [m/s]	1,39	0,56	0,83	0,2
Pressione atmosferica Pr [hPa]	1005,4	1005,4	1005,4	0,0
Temperatura radiante [°C]	48	46,7	47,3	0,4

Indici di comfort/discomfort termico (UNI EN ISO 7730)				
Indicatori benessere termico	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std.**
Voto medio previsto PMV [-]	4,89	4,73	4,80	0,0
Percentuale insoddisfatti PPD [%]	100,00	100,00	100,00	0,0
Voto medio previsto PMV [-]			4,80	
Percentuale insoddisfatti PPD [%]			100,0	

Indice di stress termico WBGT (UNI EN ISO 7243)				
Indicatori stress termico WBGT	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std.**
WBGT-indoor [°C]	34,5	34,3	34,4	0,1
WBGT-outdoor [°C]	34,5	34,2	34,3	0,1
Ambiente indoor o outdoor?			Interno	
WBGT eff [°C]			34,4	
WBGT limite acclimatato [°C]			29,3	
WBGT limite non acclimatato [°C]			26,3	
La persona è acclimatata?			Si	
Il WBGT effettivo supera il WBGT limite di riferimento?			Si	

Indice di stress termico PHS (UNI EN ISO 7933)		
Indicatori stress termico PHS	Valore	
Il soggetto è acclimatato?	Si	
Il soggetto può bere liberamente di bere?	Si	
In quale posizione lavora la persona?	In piedi	
La velocità di camminamento è nota?	No	-
La direzione di camminamento è nota?	No	-
La persona è esposta all'ambiente severo caldo per tutta la giornata lavorativa?	No	
Per quanti minuti [min] è esposte all'ambiente severo caldo?	210	
La persona indossa un abbigliamento riflettente?	No	
Calcolo perdità di liquidi, temperatura rettale e relativi tempi limite		
Water Loss al termine dell'esposizione [g]		2897,9
$D_{limloss95}$ [min]		252
Temperatura rettale al termine dell'esposizione [°C]		37,9
$D_{limtrer}$ [min]		217
DLE tempo limite esposizione [min]		217
Il tempo limite di d'esposizione viene superato?	No	

CALCOLO DEGLI INDICI MICROCLIMATICI	ID MISURA	1.4

Tipologia d'ambiente			AREA DI SCOVOLATURA
Parametro soggetto	**Parametro soggetto 1.4**		
Parametro	Valore	Unit.Misura	
Resistenza termica vestiario Icl	1,05	clo	
Area di superficie corporea A_{du}	2,16	m_2	
Energia termica metabolica attività M	142,1	W/m_2	

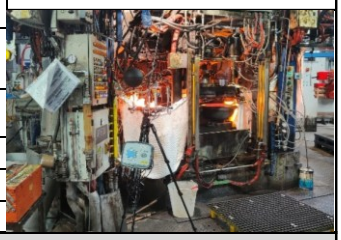
Dati Ambientali Acquisiti - ID Misura 1.4: AREA DI SCOVOLATURA				
Indicatore	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std**
Temp. bulbo umido Tw [°C]	29,4	29	29,1	0,1
Temp. globotermometro Tg [°C]	46,6	46,5	46,6	0,0
Temp. aria Ta [°C]	46,4	45,7	46,1	0,2
Umidità relativa RH [%]	27,2	25,6	26,2	0,4
Velocità dell'aria [m/s]	1,39	0,56	0,83	0,2
Pressione atmosferica Pr [hPa]	1005,4	1005,4	1005,4	0,0
Temperatura radiante [°C]	48	46,7	47,3	0,4

Indici di comfort/discomfort termico (UNI EN ISO 7730)				
Indicatori benessere termico	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std.**
Voto medio previsto PMV [-]	4,97	4,81	4,88	0,0
Percentuale insoddisfatti PPD [%]	100,00	100,00	100,00	0,0
Voto medio previsto PMV [-]			4,88	
Percentuale insoddisfatti PPD [%]			100,0	

Indice di stress termico WBGT (UNI EN ISO 7243)				
Indicatori stress termico WBGT	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std.**
WBGT-indoor [°C]	34,5	34,3	34,4	0,1
WBGT-outdoor [°C]	34,5	34,2	34,3	0,1
Ambiente indoor o outdoor?			Interno	
WBGT eff [°C]			34,4	
WBGT limite acclimatato [°C]			28,1	
WBGT limite non acclimatato [°C]			24,8	
La persona è acclimatata?			Si	
Il WBGT effettivo supera il WBGT limite di riferimento?			Si	

Indice di stress termico PHS (UNI EN ISO 7933)		
Indicatori stress termico PHS	Valore	
Il soggetto è acclimatato?	Si	
Il soggetto può bere liberamente di bere?	Si	
In quale posizione lavora la persona?	In piedi	
La velocità di camminamento è nota?	No	-
La direzione di camminamento è nota?	No	-
La persona è esposta all'ambiente severo caldo per tutta la giornata lavorativa?	No	
Per quanti minuti [min] è esposte all'ambiente severo caldo?	210	
La persona indossa un abbigliamento riflettente?	-	
Calcolo perdità di liquidi, temperatura rettale e relativi tempi limite		
Water Loss al termine dell'esposizione [g]		3422,1
$D_{limloss95}$ [min]		279
Temperatura rettale al termine dell'esposizione [°C]		38,2
$D_{limtrer}$ [min]		150
DLE tempo limite esposizione [min]		150
Il tempo limite di d'esposizione viene superato?	Si	

CALCOLO DEGLI INDICI MICROCLIMATICI	ID MISURA	1.5

Tipologia d'ambiente			AREA DI SCOVOLATURA
Parametro soggetto	**Parametro soggetto 1.5**		
Parametro	Valore	Unit.Misura	
Resistenza termica vestiario Icl	1,05	clo	
Area di superficie corporea A_{du}	1,84	m_2	
Energia termica metabolica attività M	133,3	W/m_2	

Dati Ambientali Acquisiti - ID Misura 1.5: AREA DI SCOVOLATURA				
Indicatore	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std**
Temp. bulbo umido Tw [°C]	29,4	29	29,1	0,1
Temp. globotermometro Tg [°C]	46,6	46,5	46,6	0,0
Temp. aria Ta [°C]	46,4	45,7	46,1	0,2
Umidità relativa RH [%]	27,2	25,6	26,2	0,4
Velocità dell'aria [m/s]	1,39	0,56	0,83	0,2
Pressione atmosferica Pr [hPa]	1005,4	1005,4	1005,4	0,0
Temperatura radiante [°C]	48	46,7	47,3	0,4

Indici di benessere termico (UNI EN ISO 7730)				
Indicatori benessere termico	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std.**
Voto medio previsto PMV [-]	4,90	4,74	4,81	0,0
Percentuale insoddisfatti PPD [%]	100,00	100,00	100,00	0,0
Voto medio previsto PMV [-]			4,81	
Percentuale insoddisfatti PPD [%]			100,00	

Indice di stress termico WBGT (UNI EN ISO 7243)				
Indicatori stress termico WBGT	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std.**
WBGT-indoor [°C]	34,5	34,3	34,4	0,1
WBGT-outdoor [°C]	34,5	34,2	34,3	0,1
Ambiente indoor o outdoor?			Interno	
WBGT eff [°C]			34,4	
WBGT limite acclimatato [°C]			29,2	
WBGT limite non acclimatato [°C]			26,2	
La persona è acclimatata?			No	
Il WBGT effettivo supera il WBGT limite di riferimento?			Si	

Indice di stress termico PHS (UNI EN ISO 7933)		
Indicatori stress termico PHS	Valore	
Il soggetto è acclimatato?	Si	
Il soggetto può bere liberamente di bere?	Si	
In quale posizione lavora la persona?	In piedi	
La velocità di camminamento è nota?	No	-
La direzione di camminamento è nota?	No	-
La persona è esposta all'ambiente severo caldo per tutta la giornata lavorativa?	No	
Per quanti minuti [min] è esposte all'ambiente severo caldo?	480	
La persona indossa un abbigliamento riflettente?	No	
Calcolo perdità di liquidi, temperatura rettale e relativi tempi limite		
Water Loss al termine dell'esposizione [g]		2913,7
$D_{limloss95}$ [min]		245
Temperatura rettale al termine dell'esposizione [°C]		38,1
$D_{limtrer}$ [min]		203
DLE tempo limite esposizione [min]		203
Il tempo limite di d'esposizione viene superato?	Si	

CALCOLO DEGLI INDICI MICROCLIMATICI	Parametro Soggetto Medio

Tipologia d'ambiente			AREA DI SCOVOLATURA
Parametro soggetto	**Parametro Soggetto Medio**		
Parametro	Valore	Unit.Misura	
Resistenza termica vestiario Icl	1,05	clo	
Area di superficie corporea A_{du}	1,93	m_2	
Energia termica metabolica attività M	134,5	W/m_2	

Dati Ambientali acquisiti				
Indicatore	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std**
Temp. bulbo umido Tw [°C]	29,4	29	29,1	0,1
Temp. globotermometro Tg [°C]	46,6	46,5	46,6	0,0
Temp. aria Ta [°C]	46,4	45,7	46,1	0,2
Umidità relativa RH [%]	27,2	25,6	26,2	0,4
Velocità dell'aria [m/s]	1,39	0,56	0,83	0,2
Pressione atmosferica Pr [hPa]	1005,4	1005,4	1005,4	0,0
Temperatura radiante [°C]	48	46,7	47,3	0,4

Indici di benessere termico (UNI EN ISO 7730)				
Indicatori benessere termico	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std.**
Voto medio previsto PMV [-]	4,90	4,74	4,81	0,1
Percentuale insoddisfatti PPD [%]	100,00	100,00	100,00	0,0
Voto medio previsto PMV [-]			4,81	
Percentuale insoddisfatti PPD [%]			100,00	

Indice di stress termico WBGT (UNI EN ISO 7243)				
Indicatori stress termico WBGT	**Massimo**	**Minimo**	**Media**	**dev. Std.**
WBGT-indoor [°C]	34,5	34,3	34,4	0,1
WBGT-outdoor [°C]	34,5	34,2	34,3	0,1
Ambiente indoor o outdoor?			Interno	
WBGT eff [°C]			34,4	
WBGT limite acclimatato [°C]			28,9	
WBGT limite non acclimatato [°C]			25,9	
La persona è acclimatata?			Si	
Il WBGT effettivo supera il WBGT limite di riferimento?			Si	

Indice di stress termico PHS (UNI EN ISO 7933)		
Indicatori stress termico PHS	Valore	
Il soggetto è acclimatato?	Si	
Il soggetto può bere liberamente di bere?	Si	
In quale posizione lavora la persona?	In piedi	
La velocità di camminamento è nota?	No	-
La direzione di camminamento è nota?	No	-
La persona è esposta all'ambiente severo caldo per tutta la giornata lavorativa?	No	
Per quanti minuti [min] è esposte all'ambiente severo caldo?	210	
La persona indossa un abbigliamento riflettente?	No	
Calcolo perdità di liquidi, temperatura rettale e relativi tempi limite		
Water Loss al termine dell'esposizione [g]		3047,6
$D_{limloss95}$		257
Temperatura rettale al termine dell'esposizione [°C]		38,1
$D_{limtrer}$		201
DLE tempo limite esposizione [min]		201
Il tempo limite di d'esposizione viene superato?	Si	