



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

António Maria da Costa e Silva

**COMPORTAMENTO TERMOFISIOLÓGICO DO
CORPO HUMANO EM POSTOS DE TRABALHO
EM AMBIENTES FRIOS**

**Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica orientada
pelo Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo e apresentada ao
Departamento de Engenharia Mecânica.**

Setembro de 2021

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

COMPORTAMENTO TERMOFISIOLÓGICO DO CORPO HUMANO EM POSTOS DE TRABALHO EM AMBIENTES FRIOS

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

THERMOPHYSIOLOGICAL BEHAVIOR OF THE HUMAN BODY WHEN WORKING IN COLD ENVIRONMENTS.

Autor

António Maria da Costa e Silva

Orientador

António M. M. Raimundo

Júri

Presidente Professor Doutor José Joaquim da Costa
Professor Associado da Universidade de Coimbra

Vogal Professor Doutor Avelino Virgílio F. Monteiro Oliveira
Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Coimbra

Orientador Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, setembro, 2021

Vá além do que é esperado.

Larry Page

À minha família e amigos.

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio da minha família, amigos e colegas. Sem esquecer os Professores desta grandiosa instituição.

À minha Família pelo apoio incessante ao longo destes anos. Aos meus amigos por sempre me ajudarem e incentivarem.

Aos docentes que me acompanharam ao longo desta jornada, um obrigado pela aprendizagem e experiência que me proporcionaram.

Resumo

Este trabalho tem por objetivo realizar a análise do comportamento termofisiológico do corpo humano quando exposto a períodos de trabalho prolongados em ambientes térmicos frios, nomeadamente em postos de trabalho em ambiente frio. A exposição a este tipo de ambientes é reconhecida como fator contribuinte para efeitos nefastos no organismo humano. Esses mesmos variam em grau de gravidade, podendo em casos extremos ter consequência fatais. Assim sendo, torna-se essencial prever esses mesmos efeitos e tentar mitigá-los. Para tal, recorre-se normalmente a softwares de simulação da resposta termofisiológica do corpo humano. O software *HuTheReg* apresenta-se como um aliado fundamental neste processo. Este software de simulação considera o corpo humano supostamente dividido em 22 (vinte e duas) secções, cada uma correspondente a uma parte do corpo, a qual é assumida como composta por 5 camadas.

Numa primeira fase, recorrer-se-á a dados obtidos em trabalhos de campo, relativos a situações reais de trabalhadores expostos a ambientes relevantes para o estudo em causa. Tendo em conta esses mesmos dados foi realizada uma simulação, recorrendo ao software *HuTheReg*, relativa à jornada de trabalho de um operário, obtendo os valores de evolução da temperatura de partes do corpo humano com importância para a saúde e o bem-estar dos trabalhadores.

É, assim, possível prever eventuais reações termofisiológicas. Previstas essas mesmas reações, caso sejam indesejáveis, tomar medidas corretivas que possibilitem aos trabalhadores jornadas de trabalho com segurança e sem receios pelo seu bem-estar.

Foi possível concluir que os níveis de stress térmico aos quais os trabalhadores das zonas de manufatura e zonas de expedição e comércio se encontram sujeitos não se apresentam com potencial para elevada perigosidade para os trabalhadores. No entanto, as condições verificadas nesses postos de trabalho não são perfeitas, havendo ainda espaço para melhoria das mesmas.

Palavras-chave: Ambientes térmicos frios, HuTheReg, postos de manufatura, stress térmico, comportamento termofisiológico do corpo humano

Abstract

This work aims to perform an analysis of the thermophysiological behavior of the human body when exposed to prolonged periods of work in cold thermal environments, namely in manufacturing stations. Exposure to this type of environment is recognized as a contributing factor to adverse effects on the human body. These vary in degree of severity, and in extreme cases can have fatal consequences. Therefore, it becomes essential to predict these effects and try to mitigate them. To do this, we usually resort to software that simulates the thermophysiological response of the human body. The *HuTheReg* software is a fundamental ally in this process. This simulation software considers the human body supposedly divided into 22 (twenty-two) sections, each one corresponding to a part of the body, which is assumed to be composed of 5 layers.

In a first stage, we will use data, obtained in field work, related to real situations of workers exposed to environments relevant to the study in question. Considering these same data, the simulation, using the *HuTheReg* software, was performed for the working day of a worker, obtaining the values of temperature evolution of human body parts with importance for the health and well-being of workers.

It is thus possible to predict possible thermophysiological reactions. Once these reactions have been predicted, if they are undesirable, corrective measures can be taken to allow the workers to work safely and without fear for their well-being.

It was possible to conclude that the levels of heat stress to which workers in the manufacturing and shipping and commercial areas are subjected do not present the potential to be dangerous to the workers. However, the conditions at these workplaces are not perfect, and there is still room for improvement.

Keywords: Cold thermal environments, HuTheReg, manufacturing stations, heat stress, thermophysiological behavior of the human body

Índice

Índice de Figuras	vi
Índice de Tabelas	vii
Simbologia e Siglas	viii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Revisão Bibliográfica	3
1.3. Objetivos	4
2. FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO	5
2.1. Termorregulação Humana	5
2.2. Balanço Térmico ao Corpo Humano	7
2.3. O Software HuTheReg	9
2.3.1. Estrutura global	9
2.3.2. Metodologia de cálculo	11
2.3.3. Potencialidades e limitações	13
2.3.4. Inputs	14
2.3.5. Outputs	15
3. CASOS EM ESTUDO	17
3.1. Zonas de Manufatura em Ambiente Frio	18
3.2. Zonas de Expedição e Comércio em Ambiente Frio	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
4.1. Zonas de Manufatura em Ambiente Frio	22
4.2. Zonas de Expedição e Comércio em Ambiente Frio	30
4.3. Discussão e Análise Comparativa	37
5. CONCLUSÕES	39
REFERÊNCIAS	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Divisão em segmentos do corpo humano (adaptado de Ribeiro, 2016).....	10
Figura 4.1: Evolução da temperatura do hipotálamo e da temperatura retal do indivíduo ao longo do dia de trabalho numa zona de manufatura em ambiente frio: (a) situação de vestuário real; (b) situação de vestuário 30 % menos isolante.	23
Figura 4.2: Evolução da temperatura da pele das mãos do indivíduo ao longo do dia de trabalho numa zona de manufatura em ambiente frio: (a) situação de vestuário real; (b) situação de vestuário 30 % menos isolante.....	25
Figura 4.3: Evolução do calor acumulado pelo corpo do indivíduo ao longo do dia de trabalho numa zona de manufatura em ambiente frio: (a) situação de vestuário real; (b) situação de vestuário 30 % menos isolante.....	27
Figura 4.4: Evolução dos índices PMV e PPD relativos ao indivíduo durante o dia de trabalho numa zona de manufatura em ambiente frio: (a) situação de vestuário real; (b) situação de vestuário 30 % menos isolante.....	29
Figura 4.5: Evolução da temperatura do hipotálamo e da temperatura retal do indivíduo ao longo do dia de trabalho numa zona de expedição e comércio com ambiente frio: (a) situação de vestuário real; (b) situação de vestuário 30 % menos isolante.	31
Figura 4.6: Evolução da temperatura da pele das mãos ao longo do dia de trabalho numa zona de expedição e comércio com ambiente frio: (a) situação de vestuário real; (b) situação de vestuário 30 % menos isolante.....	32
Figura 4.7: Evolução calor acumulado ao longo do dia de trabalho pelo corpo de um indivíduo numa zona de expedição e comércio com ambiente frio: (a) situação de vestuário real; (b) situação de vestuário 30 % menos isolante.....	34

Figura 4.8: Evolução dos índices PMV, PPD e Draught relativos a um indivíduo ao longo do dia de trabalho numa zona de expedição e comércio com ambiente frio: (a) situação de vestuário real; (b) situação de vestuário 30 % menos isolante. 36

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1- Isolamento do vestuário em cada segmento do corpo durante os períodos de trabalho em zonas de manufatura em ambiente térmico frio (Oliveira et al., 2008a, 2014).....	18
Tabela 3.2- Características ambientais e aspetos importantes da jornada de trabalho em zonas de manufatura em ambiente térmico frio (Oliveira et al., 2008a, 2014).	19
Tabela 3.3- Isolamento do vestuário em cada segmento do corpo durante os períodos de trabalho em zonas de expedição e comércio com ambiente térmico frio (Oliveira et al., 2008a, 2014).	20
Tabela 3.4- Características ambientais e aspetos importantes da jornada de trabalho em zonas de expedição e comércio com ambiente térmico frio (Oliveira et al., 2008a, 2014).	21

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

A_{du} – Área da superfície corporal [m^2]

B_i – Trocas entre o nodo i e o compartimento central do sangue [W]

C – Trocas de calor por convecção [W]

ce – Calor latente da água [J/kg.°C]

$Cond1_i$ – Perdas de calor por condução para o vestuário no nodo i [W]

$Cond2_i$ – Perdas de calor por condução das partes nuas no nodo i [W]

$Conv_i$ – Perdas de calor por convecção para a envolvente no nodo i [W]

c_p – Calor específico do ar, a pressão constante [J/kg.°C]

cp_b – Calor específico do sangue [J/kg.°C]

cp_i – Calor específico do nodo i [J/kg.°C]

C_{res} – Trocas de calor sensível durante a respiração [W/m²]

E – Trocas de calor por evaporação [W/m²]

E_{res} – Trocas de calor latente durante a respiração [W/m²]

f_{cl} – Fator do vestuário [--]

h_c – Coeficiente de convecção entre o vestuário e o ambiente envolvente
[W/(m².°C)]

HR – Humidade relativa do ar [%]

h_R – Coeficiente de transferência de calor por radiação entre o vestuário e o
ambiente envolvente [W/(m².°C)]

I_{cl} – Isolamento intrínseco do vestuário [clo]

K – Trocas de calor por condução na pele [W/m²]

M – Taxa metabólica de geração de calor [met]

m_b – Massa específica sangue [kg]

-
- MB_i – Metabolismo basal do nodo i [W]
 m_i – Massa específica do nodo i [kg]
 p_a – Pressão parcial de vapor de água [kPa]
 PE – Duração do período de trabalho [horas]
 PR – Duração do período de recuperação [horas]
 $Presp_i$ – Perdas de calor por respiração no nodo i [W]
 $p_{sk,s}$ – Pressão de saturação de vapor na superfície da pele [W]
 $Q_{j,i}$ – Calor transferido por condução no interior de cada segmento [W]
 R – Trocas de calor por radiação [W/m^2]
 $Rad1_i$ – Perdas por radiação infravermelha no nodo i [W]
 $Rad2_i$ – Perdas por incidência relativa de uma fonte específica no nodo i [W]
 R_{ev} – Resistência total de evaporação entre a camada limite de ar e o vestuário ou a superfície da pele
 $Resp_i$ – Perdas por respiração no nodo i [W]
 S – Variação do calor acumulado no corpo humano [W/m^2]
 Sh_i – Geração de calor por tremuras no nodo i [W]
 Sw_i – Perdas de calor por transpiração no nodo i [W]
 T_a – Temperatura do ar ambiente [$^{\circ}C$]
 T_{exp} – Temperatura do ar expirado [$^{\circ}C$]
 T_{hyp} – Temperatura do hipotálamo [$^{\circ}C$]
 T_{mr} – Temperatura média radiante [$^{\circ}C$]
 T_{op} – Temperatura operativa [$^{\circ}C$]
 T_{sk} – Temperatura média da pele [$^{\circ}C$]
 \dot{V} – Caudal volúmico de respiração [L/min]
 V_a – Velocidade do ar [m/s]
 W – Trabalho externo [W/m^2]
 w – Fração da pele que se encontra humedecida [%]
 W_a – Humidade absoluta do ar ambiente [$kg_{\text{água}}/kg_{\text{arseco}}$]

We_i – Trabalho externo ou movimento no nodo i [W]

W_{exp} – Humidade absoluta do ar expirado [$\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{arseco}}$]

Wi_i – Trabalho interno no nodo i [W]

Siglas

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

ISO –International Organization for Standardization

IREQ – Required Clothing Insulation

OMS – Organização Mundial da Saúde (WHO - World Health Organization)

OMAG – Oklahoma Municipal Assurance Group

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

O corpo humano apresenta-se com um organismo sensível à variação da temperatura do ambiente que o rodeia. Assim sendo, consideram-se três níveis de satisfação relativamente ao ambiente térmico: conforto térmico, desconforto térmico e stress térmico.

No primeiro nível, o indivíduo apresenta uma situação de equilíbrio relativamente ao ambiente envolvente, não sendo necessário tomar qualquer tipo de medidas corretivas, ou seja: o indivíduo “não tem nem frio nem calor”.

No segundo nível, verifica-se uma situação de desequilíbrio entre o indivíduo e o ambiente circundante, sendo que este desconforto pode ter várias origens: o indivíduo pode sentir-se ligeiramente frio ou ligeiramente quente.

No caso do stress térmico, o corpo humano apresenta necessidade de produzir ou dissipar calor, de modo a regressar a um estado de equilíbrio com o ambiente em que se encontra. Para tal, o corpo humano apresenta processos fisiológicos que lhe permitem, de alguma forma, responder às condições térmicas do ambiente.

Esse conjunto de processos denomina-se termorregulação do corpo humano.

Os processos de termorregulação têm como objetivo que o corpo atinja um estado neutro, ou seja, que o balanço térmico do indivíduo seja nulo. Para tal, o corpo humano necessita de produzir e/ou dissipar energia calorífica conforme a necessidade. Quando necessita de produzir energia calorífica ocorre a vasoconstrição e tremuras musculares, gerando, dessa forma, energia sob a forma de calor para o corpo. No caso de ser necessário dissipar energia calorífica, o corpo humano recorre à vasodilatação e sudação como mecanismos de perda de calor.

Segundo Raimundo e Figueiredo (2009), o estado termofisiológico do corpo humano pode ser caracterizado a partir do valor da temperatura do hipotálamo (T_{hyp}). Quando

esta temperatura se encontra entre os 34°C e os 39°C o corpo humano encontra-se num estado dito de termorregulação normal. Fora desta gama de T_{hyp} o estado térmico do corpo humano está demasiado desequilibrado, o que pode levar à ocorrência de situações adversas para a pessoa. No caso da T_{hyp} ser inferior a 34°C, o indivíduo entra num estado de hipotermia moderada. É neste estado que ocorre a introversão por frio (este estado caracteriza-se pelos tremores violentos, desorientação e amnésia ligeira). Quando a T_{hyp} se encontra abaixo dos 30°C, ocorre o chamado golpe de frio, que se caracteriza por o organismo deixar de combater a descida da T_{hyp} , manifestando-se com alterações no sistema nervoso, paragem dos tremores e desmaio. Quando T_{hyp} atinge os 28°C ocorre fibrilação ventricular. O último valor crítico para ocorrência de reações por descida da T_{hyp} ocorre quando $T_{hyp} = 25^\circ\text{C}$. Quando esse valor ocorre dá-se a morte do indivíduo. Por outro lado, também, a subida da T_{hyp} para valores superiores a 39°C é prejudicial e potencialmente nociva. Entre os 39°C e os 41°C o corpo encontra-se em hipertermia ligeira, manifestando-se por suores intensos, desorientação e amnésia, estado também denominado de introversão por calor. Aos 41°C ocorre o dito golpe de calor. O corpo deixa de produzir suor e perde a capacidade de se termorregular. Aos 42°C começam a ocorrer danos cerebrais permanentes e a partir deste valor o corpo está muito perto da morte, que acontece quando se atinge uma $T_{hyp} = 44^\circ\text{C}$.

Neste estudo são analisadas situações de trabalho em ambientes térmicos moderadamente frios, os quais apresentam temperaturas do ar e média radiante entre 10° C e 16°C. Este tipo de ambientes de trabalho ocorre com frequência quer na indústria transformadora quer na distribuição de produtos refrigerados quer mesmo no comércio, o que leva a que envolva um elevado número de pessoas e tenha grande importância em termos económicos. Assim sendo, a análise destes ambientes é importante, não só para avaliar o conforto, a segurança e a saúde dos trabalhadores, mas também a nível financeiro das empresas, as quais poderão ser afetadas por eventuais baixas de produtividade dos trabalhadores relacionadas com a exposição dos mesmos a situações de stress térmico.

1.2. Revisão Bibliográfica

A saúde e o bem-estar dos trabalhadores têm-se tornado cada vez mais importantes. Nesse sentido, estudos e pesquisas tem provado o impacto negativo que a exposição a ambientes térmicos extremos induz na segurança e saúde dos trabalhadores (Oliveira et al., 2008a, 2014, 2015; Raimundo et al., 2008, 2015b).

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS, WHO em Inglês), o stress térmico define-se como a quantidade de calor que é necessário produzir ou dissipar pelo corpo humano, com o objetivo de manter o equilíbrio térmico (WHO, 1969).

Na indústria, a exposição a ambientes térmicos frios é bastante comum, com níveis de stress térmico que se podem tornar preocupantes. O trabalho em ambientes frios caracteriza-se por ser desenvolvido com temperaturas entre os -20°C e os 16°C . O trabalho nestes ambientes apresenta uma panóplia de riscos para a saúde e segurança dos trabalhadores quando comparadas com trabalhos em ambientes neutros (Raimundo et al., 2008, 2015b). Desses riscos destacam-se desconforto térmico, stress térmico, adormecimento das extremidades, lesões musculares, doenças e lesões pulmonares, problemas cardiovasculares e queimaduras por frio (Raimundo et al., 2015b; Cauthen, 2002).

Um dos índices mais utilizados para quantificar o nível de stress térmico é o IREQ-*Required Clothing Insulation* (ISO 11079, 2007; Holmér, 1984, 2009). No entanto, a avaliação do índice IREQ não é suficiente e deve ser completada recorrendo a estudos no terreno (ISO 11399,1995; Gavhed e Holmér, 1998; Griefahn, 2000). A utilização deste índice permite definir um valor mínimo para o isolamento do vestuário adequado para as atividades desenvolvidas em determinadas condições (Holmér, 1984, 2009; Ahmad et al., 2017).

Diversos estudos de campo têm sido realizados com vista a caracterizar as condições que realmente se verificam nas atividades laborais realizadas em ambientes frios, muito frios e extremamente frios, sendo de referir os trabalhos: no Japão (Tochiara, 1998; Kim et al. 2005), na Dinamarca (Nielsen, 1998) e em Portugal (Oliveira et al., 2008a, 2014). Dado fornecerem informação mais detalhada, também os modelos de simulação do

comportamento termofisiológico do corpo humano têm sido utilizados para caracterizar o stress térmico associado ao trabalho prolongado nestes ambientes, sendo de realçar os estudos de Huizenga et al. (2001), de Fiala et al. (2001) e de Raimundo et al. (2008, 2015b).

1.3. Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é analisar o comportamento termofisiológico do corpo humano em postos de trabalho em ambientes moderadamente frios. Ou seja, postos onde se requer que temperatura do ar e a temperatura média radiante sejam relativamente baixas (entre 10 e 16°C). Mais concretamente, são considerados postos de manufatura a frio (temperaturas entre 10 e 12°C) e zonas de expedição e comércio de produtos congelados e/ou refrigerados (temperaturas entre 14 e 16°C). Em ambos, o esforço físico requerido é elevado (níveis de atividade entre 2.5 e 3.0 met). Estes postos encontram-se anteriormente caracterizados em estudos de campo realizados por Oliveira *et al.* (2008a, 2014) e em estudos numéricos efetuados por Raimundo *et al.* (2008, 2015). O presente trabalho pretende assim dar continuidade a estes estudos sobre stress térmico em postos de trabalho em ambientes térmicos frios.

Nesta dissertação, a análise de cada um dos dois tipos de posto de trabalho assenta em duas etapas. Numa primeira é caracterizado o comportamento termofisiológico do corpo humano durante um dia de trabalho real, conforme caracterizado nos estudos de campo de Oliveira *et al.* (2008a, 2014), o qual inclui uma fase de laboração de 4 horas (de manhã), uma fase de repouso / recuperação de 2 horas e uma fase de laboração de 4 horas (de tarde). Na segunda etapa tentou-se encontrar soluções capazes de mitigar o nível de stress térmico a que estas pessoas estão sujeitas quando expostas a estas condições laborais.

O presente estudo é de índole numérica. Para o efetuar recorreu-se ao software *HuTheReg*, de simulação do comportamento termofisiológico do corpo humano, desenvolvido e validado por Raimundo *et al.* (2008, 2012, 2015a, 2016, 2018). A representação gráfica dos resultados obtidos foi efetuada recorrendo ao Ms Excel.

2. FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO

Como referido anteriormente, na realização deste estudo recorrer-se-á ao software, de simulação do mecanismo de termorregulação humana, HuTheReg (Raimundo, 2016; Raimundo e Figueiredo, 2009; Raimundo et al., 2008, 2012, 2015, 2018).

2.1. Termorregulação Humana

Não existe uniformidade entre as temperaturas de equilíbrio de cada órgão do corpo humano, pelo que existem permanentemente trocas de calor entre eles, maioritariamente entre cada órgão e a circulação sanguínea. Inevitavelmente, também existem trocas de calor entre o corpo humano e o ambiente exterior. A função do sistema de termorregulação do corpo humano é tentar manter cada órgão a uma temperatura o mais próximo que conseguir da “temperatura de equilíbrio” do mesmo. Quando todas as partes do corpo humano estão à sua temperatura de equilíbrio, estamos perante a situação de estado térmico neutro, o que confere à pessoa uma sensação de bem-estar. Temperaturas abaixo desta produzem uma sensação de frio e acima desta uma sensação de calor.

O estado térmico do corpo humano é o que resulta dos seus ganhos e perdas de calor. Os ganhos podem ser por geração metabólica (de modo contínuo), por tremuras (sempre que necessário) e por trocas de calor com o exterior (sempre que as condições ambientais assim o impõem). As perdas podem ser por perspiração (de modo contínuo), por sudação (sempre que necessário) e por trocas de calor com o exterior (sempre que as condições ambientais assim o impõem). No caso de os ganhos serem superiores às perdas existe aumento do calor acumulado, que se manifesta através de um aumento das temperaturas do corpo humano, as quais podem atingir valores acima da temperatura de equilíbrio (estado de hipertermia). No caso de os ganhos serem inferiores às perdas existe uma diminuição do calor acumulado, que se manifesta através de uma diminuição das temperaturas do corpo humano, as quais podem atingir valores abaixo da temperatura de equilíbrio (estado de hipotermia).

O sistema de termorregulação humana contraria os estados hipertérmicos aumentando as perdas de calor para o exterior, quer por sudorese (trocas de calor latente) quer por vasodilatação (aumento das perdas de calor sensível) e contraria os estados hipotérmicos através das tremuras (geração interna de calor) e da vasoconstrição (diminuição das perdas de calor sensível).

Existem relatos na bibliografia estimativas quer dos valores das temperaturas de equilíbrio de cada órgão quer daqueles que levam a uma sensação de desconforto quer daqueles que dão origem a patologias indesejáveis. Por exemplo, um valor de temperatura da pele superior a 45°C e inferior a 18°C leva ao aparecimento de dores (Hardy et al., 1952). A temperatura da pele associada a um estado de conforto térmico situa-se entre os 33°C e os 34°C, e diminui com o aumento do nível de atividade física (Fanger, 1967).

As temperaturas internas do corpo humano tendem a aumentar com o aumento do nível de atividade física. A temperatura no centro de regulação térmica (o hipotálamo) é de 36,8 °C em descanso e conforto, aumentando quando o nível de atividade aumenta. Para valores de temperatura deste órgão inferiores a 28°C e superiores a 43°C as consequências podem ser fatais.

Por tudo isto, uma termorregulação cuidadosa é essencial para o bem-estar e conforto dos seres humanos.

Nesse sentido, o hipotálamo surge como um importante aliado no controlo da termorregulação. Localizado no cérebro, este órgão é o centro de controlo da temperatura do corpo humano. Para tal, o hipotálamo “integra” os sinais de calor e de frio vindos dos vários termorreceptores (maioritariamente localizados na pele), o que lhe permite desencadear diversos processos de aquecimento ou de arrefecimento, conforme seja necessário. Destes processos destacam-se a vasodilatação e sudorese, no caso de necessitar de dissipar calor, e a vasoconstrição e tremores, quando for necessário produzir calor.

2.2. Balanço Térmico ao Corpo Humano

O corpo humano está em constante interação com o ambiente que o rodeia. Como tal, ocorrem em permanência trocas de calor (sensível e latente) e de água (maioritariamente no estado gasoso, mas também pode ser no estado líquido).

O balanço térmico global ao corpo humano em cada instante, envolvendo quer a geração interna de calor quer as suas trocas de calor com o exterior, pode ser representado pela seguinte expressão (ISO 7730, 2005; ASHRAE 55, 2010; ASHRAE, 2013)

$$M - W = C_{res} + E_{res} + K + C + R + E + S \quad (2.1)$$

em que a diferença entre a taxa metabólica (M [met]) e o trabalho externo (W [W/m^2]) é igual à soma de todas as trocas de calor efetuadas entre o corpo e o exterior com a variação do calor acumulado no mesmo (S [W/m^2]). De entre as trocas de calor entre o corpo humano e o exterior destacam-se a por calor sensível associado à respiração (C_{res} [W/m^2]), a por calor latente associado à respiração (E_{res} [W/m^2]), a por condução por contacto com superfícies (K [W/m^2]), a por convecção com ao ar ambiente (C [W]), a por radiação solar e radiação infravermelha (R) e a por evaporação da perspiração e da sudação (E [W/m^2]). Por norma, a equação (2.1) é definida por unidade de área da superfície corporal, ou seja, área da pele.

O trabalho externo (W [W/m^2]) em ambiente industrial é, normalmente, um valor baixo e como tal desprezável. Quanto à taxa metabólica (M [met]), o seu valor está intimamente relacionado com o nível de atividade física. Relativamente aos outros valores presentes na equação é possível realizar o seu cálculo.

A troca de calor sensível na respiração pode ser determinada pela seguinte equação:

$$C_{res} = 0,072 c_p \cdot \dot{V} \cdot \frac{T_{exp} - T_a}{A_{du}} \quad (2.2)$$

onde c_p representa o calor específico do ar, a pressão constante; \dot{V} [L/min] é o caudal volumico da respiração; T_{exp} [°C] e T_a [°C] representam a temperatura do ar expirado e a do ambiente, respetivamente; e A_{du} [m^2] representa a área da superfície corporal (área da pele), também conhecido como Área de Dubois.

Com a equação (2.3) podemos calcular o valor do calor latente associado à respiração

$$E_{res} = 0,072 ce \cdot \dot{V} \cdot \frac{W_{exp} - W_a}{A_{du}} \quad (2.3)$$

onde ce é o valor do calor latente da água, a pressão constante; W_{exp} [kg_{água}/kg_{arseco}] e W_a [kg_{água}/kg_{arseco}] representam a humidade absoluta do ar expirado e a do ar ambiente, respetivamente; e \dot{V} [L/min] e A_{du} [m²] apresentam os mesmos valores que na equação (2.2).

Relativamente ao valor das trocas de calor por condução, o seu valor seria semelhante ao esperado caso não existisse contacto com uma superfície sólida. Assim sendo o seu calor será substituído por uma combinação de trocas de calor por convecção e radiação.

A equação que exprime as trocas de calor por convecção é apresentada seguidamente.

$$C = h_c \cdot f_{cl} \cdot (T_{sk} - T_a) \quad (2.4)$$

onde h_c representa o coeficiente de convecção entre o vestuário e o ambiente envolvente; f_{cl} [--] é o fator de vestuário; e T_{sk} [°C] é a temperatura média da pele.

As trocas de calor por radiação infravermelha são descritas pela equação:

$$R = h_R \cdot f_{cl} \cdot (T_{sk} - T_{mr}) \quad (2.5)$$

onde h_R [W/(m².°C)] é o coeficiente de transferência de calor por radiação entre o ambiente envolvente e o vestuário; e T_{mr} [°C] é a temperatura média radiante.

No caso de a superfície da pele estar totalmente humedecida a troca de calor por evaporação será máxima (E_{max}) e o seu valor poderá se calculado através da equação:

$$E_{max} = \frac{p_{sk,s} - p_a}{R_{ev}} \quad (2.6)$$

onde $p_{sk,s}$ [W] representa a pressão parcial de vapor saturado na superfície da pele; p_a [kPa] a pressão parcial de vapor de água do ar ambiente; e R_{ev} representa a resistência total de evaporação entre a camada limite de ar e o vestuário ou a superfície da pele (no caso de uma pessoa nua).

Caso se verifique um humedecimento apenas parcial da pele, a perda de calor por evaporação da perspiração e da sudorese (E [W/m²]) será calculado por:

$$E = w \cdot E_{max} \quad (2.7)$$

onde w representa a fração de pele que se encontra humedecida.

Conhecidos os valores da geração interna de calor e das trocas de calor com o exterior num determinado instante no tempo, a variação nesse instante do calor acumulado no corpo humano pode ser obtida através da aplicação da equação (2.1).

2.3. O Software *HuTheReg*

2.3.1. Estrutura global

Introduzindo, agora, em maior detalhe o programa de simulação utilizado, o *HuTheReg* (Human Thermal Regulation). Trata-se de um software de simulação da resposta termofisiológica do corpo humano, e foi sendo desenvolvido ao longo dos últimos anos no DEM-FCTUC (Raimundo, 2016; Raimundo e Figueiredo, 2009; Raimundo et al., 2008, 2012, 2015, 2018).

Este software assenta na lógica do modelo de termorregulação do corpo humano desenvolvido nos anos 70 por Stolwijk para a NASA, que pretendia simular a resposta termofisiológica dos astronautas (Stolwijk, 1971). A versão inicial do *HuTheReg* (v01, de 2008) seguiu a metodologia sugerida por Tanabe et al. (2002), que apresentava uma evolução substancial face ao modelo proposto por Stolwijk em 1971. Por sua vez, a versão atual deste software (v37, de 2021) incorpora várias melhorias face à versão inicial, as quais foram implementadas levando em consideração o que foi sendo publicado na bibliografia científica sobre a modelação do sistema de termorregulação do corpo humano. Atualmente o software *HuTheReg* é uma ferramenta com uma versatilidade enorme, pois é possível a sua utilização em cenário de ambientes frios, quentes ou neutros, e com uma grande importância na avaliação e previsão de situações com potencial perigo para o corpo humano.

O modelo atualmente utilizado pelo *HuTheReg* realiza a divisão do corpo humano em 22 (vinte e dois) segmentos, como se mostra na Figura 2.1: face, escalpe, pescoço, peito, abdómen, pélvis, parte superior e inferior das costas, mão esquerda e mão direita, braço esquerdo e braço direito, ombro esquerdo e ombro direito, antebraço esquerdo e antebraço direito, coxa esquerda e coxa direita, perna esquerda e perna direita e pé esquerdo e pé direito, sendo que em cada um desses segmentos considera uma divisão em cinco camadas: núcleo, músculo, gordura, pele e vestuário. Chega-se, assim, a um total de 111 nodos, considerando também o compartimento central do sangue. A informação presente em cada um dos nodos considerados é transmitida, através da corrente sanguínea e de impulsos nervosos ao hipotálamo, que posteriormente irá traduzir essa informação em instruções que levam a reações do corpo humano.

O software realiza a simulação de diferentes cenários sucessivos (Fases) envolvendo a modelação: (i) Resposta termofisiológica do corpo humano; (ii) Funções respiratória e cardiovascular; (iii) Transporte de calor e humidade através do vestuário; (iv) Quantificação e análise do conforto térmico de cada pessoa; (v) Estimativa do stresse térmico hipertérmico ou hipotérmico; (vi) Início e evolução de lesões da pele; (vii) Detecção de situações de risco.

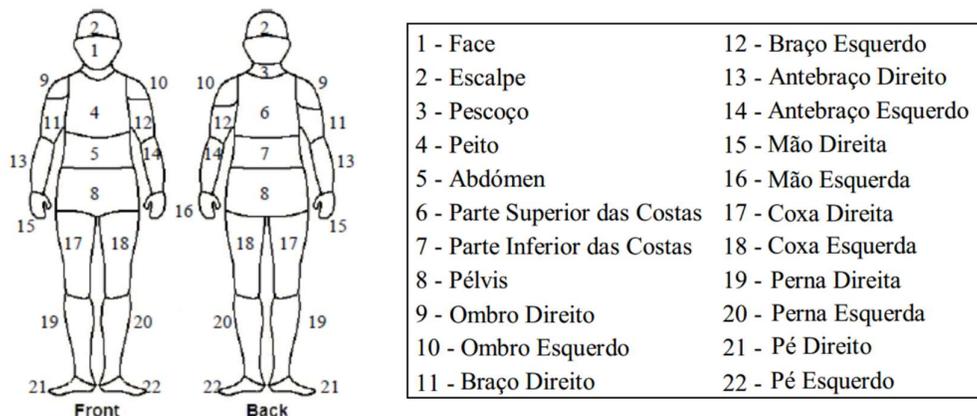


Figura 2.1: Divisão em segmentos do corpo humano (adaptado de Ribeiro, 2016)

2.3.2. Metodologia de cálculo

Como referido anteriormente, o software *HuTheReg* baseia-se num modelo que divide ao corpo humano em 111 nodos, realizando a simulação da evolução da temperatura de cada um desses nodos ao longo do tempo.

Segundo o modelo de Stolwijk (1971), a resposta termofisiológica do corpo humano é o resultado de dois sistemas. O sistema passivo, correspondente à geração de calor metabólico, às trocas de calor internas entre os vários nodos e às trocas de calor entre os nodos e o ambiente exterior. O sistema ativo (sistema de termorregulação), que é gerido pelo hipotálamo, e que atua através dos mecanismos da vasodilatação, da transpiração, da vasoconstrição e das tremuras.

Exceto para o nodo correspondente ao fluxo sanguíneo (nodo 111), a evolução ao longo do tempo (t) da temperatura (T) num determinado nodo (i) é representada pela seguinte equação (Raimundo e Figueiredo, 2009)

$$m_i \cdot cp_i \cdot \frac{\partial T_i}{\partial t} = \sum_{j=1}^{110} Q_{j,i} + MB_i + Wi_i + We_i + Sh_i - B_i - Resp_i - Persp_i - Sw_i - Cond_i - Conv_i - Rad1_i - Rad2_i \quad (2.8)$$

onde m_i e cp_i representam a massa e o calor específico de cada nodo, respetivamente; $Q_{j,i}$ representa o calor transferido por condução do nodo j para o nodo i (no interior de cada segmento); MB_i representa o calor gerado pelo metabolismo basal; Wi_i representa o calor devido ao trabalho interno; We_i representa o calor devido ao trabalho externo; Sh_i representa o calor gerado pelos tremores (este valor tem apenas representação nos nodos relativos a zonas de musculo); e B_i representa as trocas de calor entre o nodo em questão (nodo i) e a corrente sanguínea que o atravessa.

As trocas de calor pela respiração ($Resp_i$) comportam duas componentes, uma sensível e uma latente. Essa divisão é baseada nos coeficientes propostos por Fiala et al. (1999), segundo os quais 20% correspondem ao nodo do núcleo da cara, 25% ao nodo do

musculo facial, 25% ao nodo do musculo do pescoço e 30% ao nodo do núcleo do peito (os pulmões).

As perdas por perspiração ($Persp_i$) e por transpiração (Sw_i) agregam-se nas perdas de calor por evaporação e são ambas dependentes das propriedades do vestuário, do estado térmico do individuo e da pressão parcial de vapor de água na superfície da pele e do ar envolvente.

As trocas de calor com o exterior por condução ($Cond_i$) ocorrem por contacto com superfícies externas e dão-se apenas no nodo mais exterior de cada um dos 22 segmentos em que o corpo humano é supostamente subdividido, correspondendo a um nodo de vestuário (segmentos vestidos) ou da pele (segmentos nus). Em alternativa à condução de calor, nestes nodos exteriores ocorrem trocas de calor com o ar ambiente por convecção ($Conv_i$), por radiação infravermelha ($Rad1_i$) e por radiação incidente ($Rad2_i$) vinda do sol, de outra fonte específica ou de ambas.

Para o compartimento sanguíneo central a equação a utilizar na determinação do balanço térmico é a seguinte (Raimundo e Figueiredo, 2009):

$$m_b \cdot cp_b \cdot \frac{\partial T_b}{\partial t} = \sum_{i=1}^{110} B_i \quad (2.9)$$

onde m_b e cp_b são a massa específica e o calor específico do sangue, respetivamente.

Obviamente que o modelo assume algumas hipóteses simplificadores, nomeadamente um volume sanguíneo de 2,5 litros, e um calor específico de 0,580 Wh/(kg°C) para os ossos, de 0,696 Wh/(kg°C) para a gordura corporal e de 1,044 Wh/(kg°C) para os outros tecidos (Tanabe et al., 2002). O modelo foi implementado para uma pessoa do género masculino com as dimensões corporais de 1,72 m de altura, 72,43 kg e 14% de gordura (Tanabe et al., 2002; Raimundo e Figueiredo, 2009). No caso de um homem com outras dimensões antropométricas, os valores dos coeficientes do modelo são proporcionalmente alterados em função do peso, da área da pele e da percentagem de gordura (Raimundo e Figueiredo, 2009).

2.3.3. Potencialidades e limitações

O software HuTheReg, apresenta-se como uma ferramenta extremamente versátil. Com ele é possível realizar a análise da resposta termofisiológica de indivíduos do género masculino expostos a vários tipos de ambiente, desde ambientes gelados até ambientes de calor intenso. A sua versatilidade é comprovada pela sua utilização em previsão da resposta termofisiológica de bombeiros em situação de combate a incêndios (Raimundo e Figueiredo, 2009; Raimundo et al. 2018), de atletas de alta competição (Ribeiro, 2016), de trabalhadores de camaras frigoríficas de armazenamento de produtos congelados (Raimundo et al., 2008, 2015b), de trabalhadores da indústria cerâmica e vidreira (Ronda, 2017), entre outros.

No entanto, o software não permite caracterizar completamente o stress térmico do corpo humano em todas as situações. Uma das limitações é que ainda não está preparado para simular a termorregulação de pessoas do género feminino. Outra limitação reside no facto de nas simulações não levar em consideração o nível de adaptação da pessoa ao ambiente térmico em questão. O HuTheReg também não possui um módulo de cálculo da radiação solar, embora ela possa ser imposta como radiação incidente (termo Rad_{2i} da equação (2.8)), pelo que a mesma terá de ser previamente conhecida. Outras limitações prendem-se com o tipo e as características do vestuário. Nomeadamente, não é possível simular situações em que o vestuário incorpora materiais em que ocorre mudança de fase, seja ela sólido-líquido ou líquido-gasoso.

Os softwares de simulação da resposta termofisiológica do corpo humano forneçam previsões detalhadas correspondentes a estados térmicos médios de um grande número de indivíduos. No entanto, as pessoas não têm apenas opiniões diferentes, têm também características corporais diferentes e um funcionamento diferente do sistema de termorregulação, pelo que a percepção do seu próprio estado térmico é individual. Face a isto, os modelos de termorregulação não têm capacidade para substituir a avaliação individual feito pelo próprio. Como tal, também, é necessário considerar a utilização de estratégias de previsão subjetivas, estratégias essas que passam pela realização de estudos de campo e obtenção de respostas, por parte dos próprios trabalhadores, a questões

pertinentes relacionadas com o seu estado de satisfação com as diversas condições a que estes se encontram sujeitos (Oliveira et al., 2014).

Para poderem ser utilizados, os softwares de simulação da resposta termofisiológica do corpo humano necessitam de um vasto conjunto de informação quer sobre a pessoa quer sobre o ambiente. Deste modo, a validade das suas previsões não depende apenas da fiabilidade do modelo matemático, mas também da qualidade e realismo da informação que lhes é fornecida (Raimundo et al., 2015b).

2.3.4. Inputs

Como referido anteriormente, o software realiza a simulação de cenários sucessivos, designados por “fases”. Cada fase caracteriza-se por ter, ao longo da sua duração, valores constantes das características ambientais, do nível de atividade da pessoa, das características do vestuário e do modo como são determinadas trocas de calor. A alteração de qualquer um dos “inputs” anteriores exige a “definição” de uma nova fase. A versão do *HuTheReg* utilizada na realização deste trabalho (a v36, de 2020) permite um máximo de 20 fases, mas a última disponível (a v37, de 2021) já permite um máximo de 60 fases, sendo esta a principal diferença entre estas duas versões do software.

Os dados relativos a cada fase têm de ser fornecidos num ficheiro independente com um formato específico, o qual é acessível através de um editor de texto básico (do tipo *Notepad*, *Wordpad*, etc.). Todos os ficheiros de dados têm de ter o nome (no máximo com 8 dígitos) da situação a simular, sendo a fase caracterizada em cada ficheiro identificada pela correspondente extensão, por exemplo, Exemplo.p01; Exemplo.p02; ...; Exemplo.p20. É necessário definir ainda um ficheiro com os dados globais, o qual tem de ter o mesmo nome dos restantes, mas a extensão “p00”, por exemplo, Exemplo.p00. Todos os ficheiros de dados têm a mesma estrutura, excepto o correspondente aos dados globais (o *.p00), o qual tem uma estrutura diferente.

No ficheiro com os dados globais são definidos: o número de fases a simular; os parâmetros de controlo da simulação; as características corporais da pessoa (altura, peso e

percentagem de gordura); os seus parâmetros cardíacos em repouso (batimento cardíaco e pressão arterial), o seu nível de preparação física e o seu estado térmico inicial.

No ficheiro relativo a cada fase são definidos valores globais e valores para cada um dos 22 segmentos em que supostamente é dividido o corpo humano. Os valores globais a especificar são: a designação desta fase; a sua duração; o intervalo de tempo entre impressões de resultados; o nível de atividade física da pessoa; a sua postura (de pé, sentado, deitado de barriga para cima, deitado de barriga para baixo); para onde está a pessoa virada (norte, sul, este, oeste); a identificação da metodologia de cálculo dos coeficientes de transferência de calor por convecção; a identificação da metodologia de cálculo dos coeficientes de transferência de calor por radiação; os fluxos de radiação incidente em cada direção; e as características dos alimentos e bebidas ingeridos. Os valores a especificar para cada um dos 22 segmentos são: o tipo de ambiente exterior (ar ou água); as características termofísicas do vestuário (resistência térmica, permeabilidade ao vapor, emissividade radiativa, massa e calor específico); as características do fluido do ambiente exterior (temperatura, humidade relativa e velocidade); e a temperatura média radiante.

2.3.5. Outputs

Inseridos os dados e definido o número de fases, é apenas necessário correr o programa indicando o nome base dos ficheiros. Após realizar a simulação, o software devolve os dados obtidos sob a forma de 4 ficheiros distintos, os quais têm o mesmo nome base dos ficheiros de dados, mas as extensões “res”, “tsk”, “grl” e “flx”.

O ficheiro com a extensão “res” apresenta um resumo da evolução da simulação em intervalos de tempo definidos. Este ficheiro tende a ser muito extenso, pois é lá registado tudo o que vai sendo calculado. Este ficheiro pode ser aberto utilizando um editor de texto

Os ficheiros com as extensões “tsk”, “grl” e “flx” contêm as previsões ao longo do tempo das temperaturas em cada um dos 111 nodos e dos fluxos de calor envolvidos. Estes ficheiros devem se abertos utilizando o MS Excel, para que seja possível analisar o seu e representá-lo graficamente. O ficheiro com a extensão “tsk” apresenta dados relativos às temperaturas da pele nos 22 segmentos, bem como as temperaturas máxima, média e mínima

da pele. O ficheiro com a extensão “grl” contem dados relativos às temperaturas de camadas interiores de partes específicas, além de apresentar as temperaturas globais para o corpo. Por último, o ficheiro com a extensão “flx” apresenta os valores globais para os fluxos de calor sensível e latente, tenham eles sido gerados, perdidos ou acumulados pelo corpo.

3. CASOS EM ESTUDO

Ao longo deste relatório são apresentados estudos relativos a 2 tipos de áreas de trabalho em ambiente frio: (i) as zonas de manufatura e (ii) as zonas de expedição e comércio. Ambos os tipos de áreas de trabalho requerem que os trabalhadores estejam expostos a ambientes com temperaturas frias por períodos relativamente longos de tempo.

O presente estudo é de índole numérica, recorrendo para o efeito a um software de simulação da resposta termofisiológica do corpo humano, o programa *HuTheReg*. Como tal, é requerido o conhecimento prévio das características dos postos de trabalho a simular, quer em termos do trabalhador quer do ambiente térmico. Sobre a pessoa é necessário conhecer: as suas características corporais (altura, peso e percentagem de gordura); os seus parâmetros cardíacos em repouso (batimento cardíaco e pressão arterial), o seu nível de preparação física e o seu estado térmico inicial; a duração dos períodos de trabalho e de repouso e a sua sequência; e para cada um destes períodos o seu nível de atividade, as características do seu vestuário, a ingestão de alimentos e bebidas e a sua posição (de pé, sentado, ...). Sobre o ambiente térmico é necessário conhecer: o tipo de ambiente exterior; as características do fluido do ambiente exterior (temperatura, humidade relativa e velocidade); a temperatura média radiante; e a existência e características de algum tipo de radiação incidente vinda de uma fonte específica.

A informação sobre os postos de trabalho foi previamente obtida por Oliveira et al. (2008a, 2014). Trata-se de situações reais ocorridas em diversas empresas portuguesas com atividades laborais variadas, nomeadamente: indústria de laticínios; comércio e indústria de peixe; comércio e indústria de carne; comércio de produtos alimentares diversos; distribuição alimentar; e distribuição e investigação farmacêutica.

Não sendo viável obter o valor exato da resistência térmica do vestuário, Oliveira et al. (2008a, 2014) realizaram inquéritos aos trabalhadores, tendo, assim, chegado a um valor médio global do respetivo isolamento térmico intrínseco e uma descrição correspondente constituição. Tipicamente, o vestuário dos trabalhadores inclui: uma t-shirt, um casaco,

roupa interior, calças, meias, botas e luvas. Assume-se, ainda, que o trabalhador seja desprovido de cabelo e barba. Para obter as restantes características do vestuário (a permeabilidade ao vapor, a emissividade radiativa, a massa e o calor específico) recorreu-se às normas internacionais (ISO 9920, 2007; ISO 7730, 2005; ASHRAE 55, 2010;) e a estudos anteriores (Oliveira et al., 2008b, 2011; Raimundo et al., 2008, 2015b).

3.1. Zonas de Manufatura em Ambiente Frio

Relativamente ao nível de atividade, o valor obtido a partir dos trabalhos de campo realizados por Oliveira et al. (2008a, 2014) foi de $M = 2,73 \text{ met}$ ($158,75 \text{ W/m}^2$). Ora este valor representa uma atividade física com alguma intensidade.

Não sendo possível obter um cálculo exato do isolamento térmico do vestuário, foram realizados inquéritos a diversos trabalhadores destes postos de trabalho chegando-se, assim, a um valor médio de isolamento térmico intrínseco $I_{cl} = 1,14 \text{ clo}$ (Oliveira et al. (2008a, 2014). Apresenta-se na Tabela 3.1 o valor do isolamento térmico intrínseco (I_{cl}) considerado para cada secção em que supostamente se encontra dividido o corpo do trabalhador de uma zona de manufatura em ambiente térmico frio.

Tabela 3.1- Isolamento do vestuário em cada segmento do corpo durante os períodos de trabalho em zonas de manufatura em ambiente térmico frio (Oliveira et al., 2008a, 2014).

Segmento	I_{cl} [clo]	Segmento	I_{cl} [clo]
Face	0	Ombros (esquerdo e direito)	0,871
Escalpe	0	Braços (esquerdo e direito)	0,795
Pescoço	0	Antebraços (esquerdo e direito)	0,760
Peito	0,919	Mãos (esquerda e direita)	0,088
Costas superiores	0,871	Coxas (esquerda e direita)	0,512
Abdómen	0,871	Pernas (esquerda e direita)	0,565
Costas inferiores	0,871	Pés (esquerdo e direito)	0,612
Pélvis	1,054		

Nestas zonas, devido a natureza dos produtos com os quais se trabalha, há uma necessidade de manter temperaturas de cerca de 11,4°C com humidade relativa de 75%. Como forma de manter estes valores ao longo da jornada de trabalho, tipicamente recorre-se a mecanismos de ventilação mecânica, por isso mesmo a velocidade do ar apresenta-se na ordem dos 0,11 ms⁻¹.

Apresentam-se na Tabela 3.2 os valores globais médios para o trabalhador e para o ambiente térmico, a considerar nas simulações relativas ao trabalho em postos de manufatura com ambiente térmico frio.

Tabela 3.2- Características ambientais e aspetos importantes da jornada de trabalho em zonas de manufatura em ambiente térmico frio (Oliveira et al., 2008a, 2014).

Trabalhador (períodos de trabalho)				Ambiente térmico (períodos de trabalho)				
<i>M</i>	<i>I_{cl}</i>	<i>PE₁</i>	<i>PE₂</i>	<i>T_a</i>	<i>T_{mr}</i>	<i>T_{op}</i>	<i>HR</i>	<i>V_a</i>
2,73	1,14	4	4	11,4	10,6	11,0	75	0,11
met	clo	horas	horas	°C	°C	°C	%	m/s
Trabalhador (período de repouso)			Ambiente térmico (período de repouso)					
<i>M</i>	<i>I_{cl}</i>	<i>PR</i>	<i>T_a</i>	<i>T_{mr}</i>	<i>T_{op}</i>	<i>HR</i>	<i>V_a</i>	
1,2	1,05	2	25,0	24,2	24,6	40	0,11	
met	clo	horas	°C	°C	°C	%	m/s	

3.2. Zonas de Expedição e Comércio em Ambiente Frio

A principal particularidade destas zonas é a presença, para além dos operários, de clientes. Ora os clientes tipicamente não usam vestuário que permita mitigar as consequências da exposição a ambientes frios, no entanto a sua presença nestes ambientes é bastante curta, quando comparada com os trabalhadores. Assim, torna-se irrelevante para este trabalho o estudo da resposta termofisiológica dos clientes.

Em termos de valores concretos, as zonas de expedição e comércio, apresentam valores de nível de atividade de cerca de $M = 2,69$ met (Oliveira et al. (2008a, 2014).

Quanto ao vestuário, tal como no caso das zonas de manufatura, como não foi possível obter um valor exato para o isolamento disponível, foi, então, aplicado o mesmo método de determinação, chegando-se, assim, a um valor global de $I_{cl} = 1,07$ clo (Oliveira et al. (2008a, 2014). Apresenta-se na Tabela 3.3 o valor do isolamento térmico intrínseco (I_{cl}) considerado para cada secção em que supostamente se encontra dividido o corpo do trabalhador de uma zona expedição e comércio com ambiente térmico frio.

Tabela 3.3- Isolamento do vestuário em cada segmento do corpo durante os períodos de trabalho em zonas de expedição e comércio com ambiente térmico frio (Oliveira et al., 2008a, 2014).

Segmento	I_{cl} [clo]	Segmento	I_{cl} [clo]
Face	0	Ombros (esquerdo e direito)	0,818
Escalpe	0	Braços (esquerdo e direito)	0,746
Pescoço	0	Antebraços (esquerdo e direito)	0,713
Peito	0,862	Mãos (esquerda e direita)	0,083
Costas superiores	0,818	Coxas (esquerda e direita)	0,481
Abdómen	0,818	Pernas (esquerda e direita)	0,531
Costas inferiores	0,818	Pés (esquerdo e direito)	0,575
Pélvis	0,989		

As zonas de expedição e comércio com ambiente térmico frio requerem condições ambientais menos severas do que as zonas manufatura em ambiente térmico frio, quer em termos de temperaturas (do ar, operativa e média radiante que são cerca de 4 °C superiores) quer de velocidade do ar (neste caso por não haver necessidade de ventilação mecânica).

Os trabalhos de campo de Oliveira et al. (2008a, 2014) identificaram para as zonas de expedição e comércio com ambiente térmico frio os valores globais médios para o trabalhador e para o ambiente térmico apresentados na Tabela 3.4, que foram os considerados nas simulações relativas ao trabalho em zonas de expedição e comércio com ambiente térmico frio.

Tabela 3.4- Características ambientais e aspetos importantes da jornada de trabalho em zonas de expedição e comércio com ambiente térmico frio (Oliveira et al., 2008a, 2014).

Trabalhador (períodos de trabalho)				Ambiente térmico (períodos de trabalho)				
M	I_{cl}	PE_1	PE_2	T_a	T_{mr}	T_{op}	HR	V_a
2,69	1,07	4	4	15,5	15,8	15,65	63	0,03
met	clo	horas	horas	°C	°C	°C	%	m/s
Trabalhador (período de repouso)				Ambiente térmico (período de repouso)				
M	I_{cl}	PR		T_a	T_{mr}	T_{op}	HR	V_a
1,2	1,02	2		25,0	24,2	24,6	40	0,11
met	clo	horas		°C	°C	°C	%	m/s

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao longo deste capítulo serão apresentados, discutidos e comparados os resultados obtidos o software *HuTheReg*. Para esta dissertação foram analisados dois tipos de postos de trabalho em ambientes frios, como referido anteriormente: as zonas de manufatura e as zonas de expedição e comércio. Em ambos os casos, foram realizadas simulações para a situação de vestuário real e para uma situação hipotética de vestuário menos isolante. Na situação de vestuário real considera-se que o isolamento térmico intrínseco do vestuário (I_{cl}) tem o valor médio identificado nos trabalhos de campo realizados por Oliveira et al. (2008a, 2014), o qual se apresenta nas Tabelas 3.1 a 3.4. Considera-se ainda que o valor do isolamento térmico intrínseco do vestuário (I_{cl}) é 30 % inferior ao valor médio identificada nas Tabelas 3.1 a 3.4. A análise de resultados recorre a gráficos referentes a parâmetros com grande importância na caracterização da evolução do stress térmico dos indivíduos, nomeadamente a temperatura do hipotálamo, a temperatura média do corpo, o calor acumulado, entre outros.

4.1. Zonas de Manufatura em Ambiente Frio

Os parâmetros identificados nos trabalhos de campo de Oliveira et al. (2008a, 2008b, 2011, 2014) relativos ao trabalhador e ao ambiente térmico para as zonas de manufatura em ambiente térmico frio encontram-se indicados nas Tabelas 3.1 e 3.2.

Os primeiros parâmetros em análise para as zonas de manufatura são as temperaturas do hipotálamo (T_{hyp}), retal (T_{rectal}), média do corpo (T_{body}) e mínima da pele ($T_{skin-min}$), cuja evolução com o tempo se apresenta na Figura 4.1 para as situações de vestuário real (Figura 4.1(a)) e de vestuário 30 % menos isolante (Figura 4.1(b)). Quando a temperatura do hipotálamo ultrapassa determinados limites podem ocorrer patologias indesejáveis. De entre estas, as que aparecem em primeiro lugar são a introversão por frio excessivo (*Cold introversion*, $T_{hyp} \leq 34$ °C) e a introversão por calor excessivo (*Hot introversion*, $T_{hyp} \geq 39$ °C). Como tal, estas temperaturas também se encontram marcadas na Figura 4.1.

No caso em estudo, a temperatura mais baixa de cada segmento do corpo é sempre a da pele, como tal, a temperatura mínima da pele ($T_{skin-min}$) representa a temperatura do nodo do corpo do trabalhador que está à temperatura mais baixa.

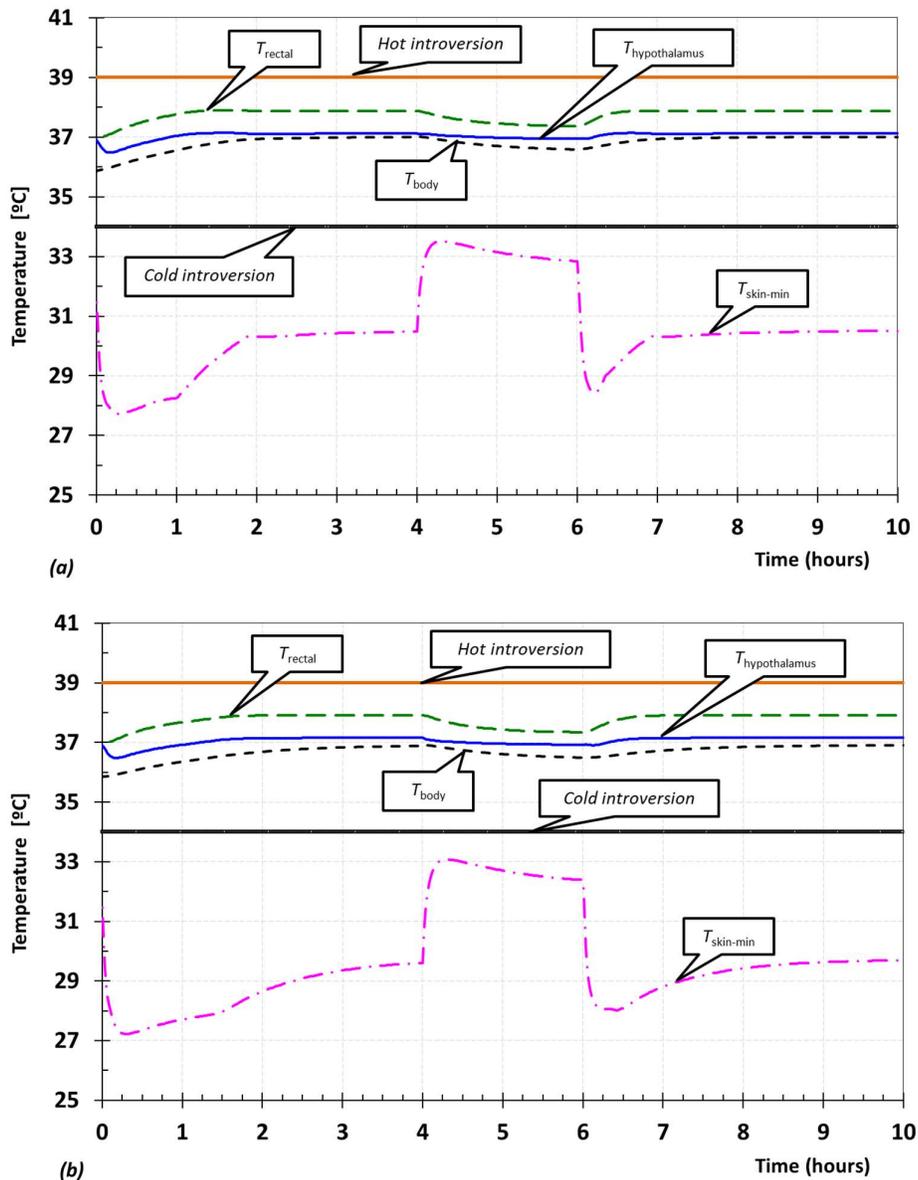


Figura 4.1: Evolução da temperatura do hipotálamo e da temperatura retal do indivíduo ao longo do dia de trabalho numa zona de manufatura em ambiente frio: (a) situação de vestuário real; (b) situação de vestuário 30 % menos isolante.

Como podemos observar a partir da análise da Figura 4.1(a), na situação de vestuário real a temperatura do hipotálamo apresenta-se num intervalo considerado seguro, nunca se aproximando excessivamente de valores críticos. Verifica-se uma variação contínua, mas muito moderada, das temperaturas corporais (T_{hyp} , T_{rectal} e T_{body}), apresentando um aumento durante ambos os períodos de trabalho e uma diminuição durante o período de repouso. Por sua vez, a temperatura mínima da pele ($T_{skin-min}$) sofre uma variação acentuada sempre que há uma mudança de ambiente térmico, sendo evidente a sua grande relação com a temperatura do ambiente em que o indivíduo se encontra. Mesmo, assim a $T_{skin-min}$ nunca se aproxima do valor em que surgiria dor por frio (18 °C). No entanto, realça-se que nas simulações não se considerou qualquer contacto entre a pele do trabalhador e os produtos (os quais podem estar a temperaturas muito baixas).

Na situação de vestuário 30% menos isolante do que o real (Figura 4.1(b)), não se nota uma diferença perceptível das temperaturas corporais (T_{hyp} , T_{rectal} e T_{body}) face à situação de vestuário real. Por sua vez, a temperatura mínima da pele ($T_{skin-min}$) apresenta o mesmo comportamento, mas os seus valores são ligeiramente inferiores.

Uma vez que se trata de uma situação de trabalho na qual as mãos apresentam um papel de extrema importância, o próximo passo para a caracterização do stress térmico passa pela análise da temperatura das mesmas ao longo da jornada de trabalho. No entanto, volta-se a realçar que nas simulações não se considerou qualquer contacto entre a pele do trabalhador e os produtos (os quais podem estar a temperaturas muito baixas). Isto é pouco realista no caso das tarefas em que os trabalhadores têm de manusear os produtos diretamente com as mãos.

Apresenta-se, na Figura 4.2 a representação gráfica da evolução da temperatura da pele das mãos ($T_{skin-hands}$) com o tempo para um trabalhador de um posto de manufatura com ambiente térmico frio, utilizando o vestuário real (Figura 4.2(a)) e utilizando um vestuário com menos 30% de isolamento térmico (Figura 4.2(b)).

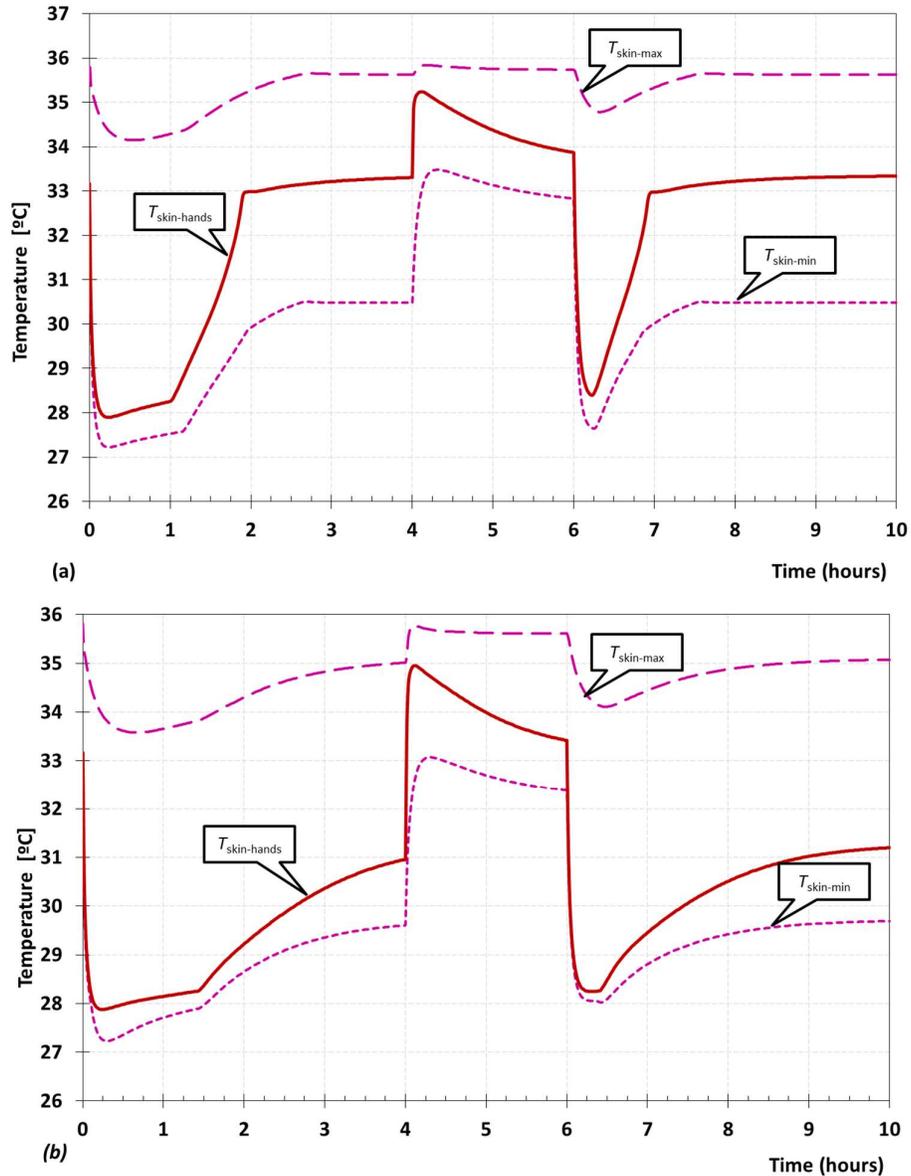


Figura 4.2: Evolução da temperatura da pele das mãos do indivíduo ao longo do dia de trabalho numa zona de manufatura em ambiente frio: (a) situação de vestuário real; (b) situação de vestuário 30 % menos isolante.

Analisando os valores presentes na Figura 4.2 verifica-se que, quer na situação de trabalhador utilizando o vestuário real (Figura 4.2(a)) que utilizando um vestuário com menos 30% de isolamento térmico (Figura 4.2(b)), a temperatura das mãos ($T_{skin-hands}$) está sempre entre a temperatura mínima da pele ($T_{skin-min}$) e a temperatura máxima da pele

($T_{skin-max}$), mas muito mais próxima de $T_{skin-min}$ do que $T_{skin-max}$. Embora na situação de vestuário com menor isolamento térmico as temperaturas sejam mais baixas, a diferença face ao uso do vestuário real é muito pouco significativa. Verifica-se ainda que a temperatura em que surge dor na pele por temperatura muito baixa (18 °C) nunca acontece. Logo, esta dor poderá ocorrer apenas por contacto prolongado com superfícies muito frias, por exemplo, com produtos congelados.

Um bom indicador do stress térmico sentido por um individuo é o calor acumulado pelo corpo humano ao longo do período de exposição a determinado ambiente. Por isso, apresenta-se na Figura 4.3 a evolução do calor acumulado pelo corpo do trabalhador (Q_{stored}) e a temperatura média do corpo (T_{body}) ao longo da jornada de trabalho, correspondentes à situação com vestuário real (Figura 4.3 (a)) e à situação hipotética em que se considera que o vestuário tem menos 30% de resistência térmica (Figura 4.3 (b)).

Analisando a Figura 4.3 verifica-se que, em ambas as situações, existe uma relação direta entre o calor acumulado (Q_{stored}) e a temperatura média do corpo (T_{body}). O calor acumulado aumenta continuamente durante os períodos de trabalho, de modo mais intenso no início e de modo mais suave no fim, atingindo o seu valor máximo (43,66 Wh/m²) no final dos mesmos. O valor de Q_{stored} sofre uma redução significativa durante o período de repouso (26,98 Wh/m²), mesmo assim, a mesma não é suficiente para se aproximar do valor verificado no início do primeiro período de trabalho (-0,12 Wh/m²). Comparando os valores representados na Figura 4.3(a) com os da Figura 4.3(b), verifica-se que a redução em 30% do isolamento térmico do vestuário leva a uma nítida redução do valor do calor acumulado, sugerindo um menor grau de stress térmico do trabalhador.

Na situação de vestuário real (Figura 4.3(a)) o valor de Q_{stored} ultrapassa os 40 Wh/m² ao fim de cerca de 117 minutos no primeiro período de trabalho e ao fim de cerca de 56 minutos no segundo período de trabalho, o que é indicativo de que é atingida uma situação de stress térmico por excesso de calor. Na situação de vestuário com menos 30% de isolamento térmico (Figura 4.3(b)) o valor de Q_{stored} nunca chega a atingir os os 40 Wh/m², atingindo um valor máximo de 39,52 Wh/m². Logo, o uso de um vestuário com isolamento térmico inferior ao atualmente utilizado pode ser benéfico.

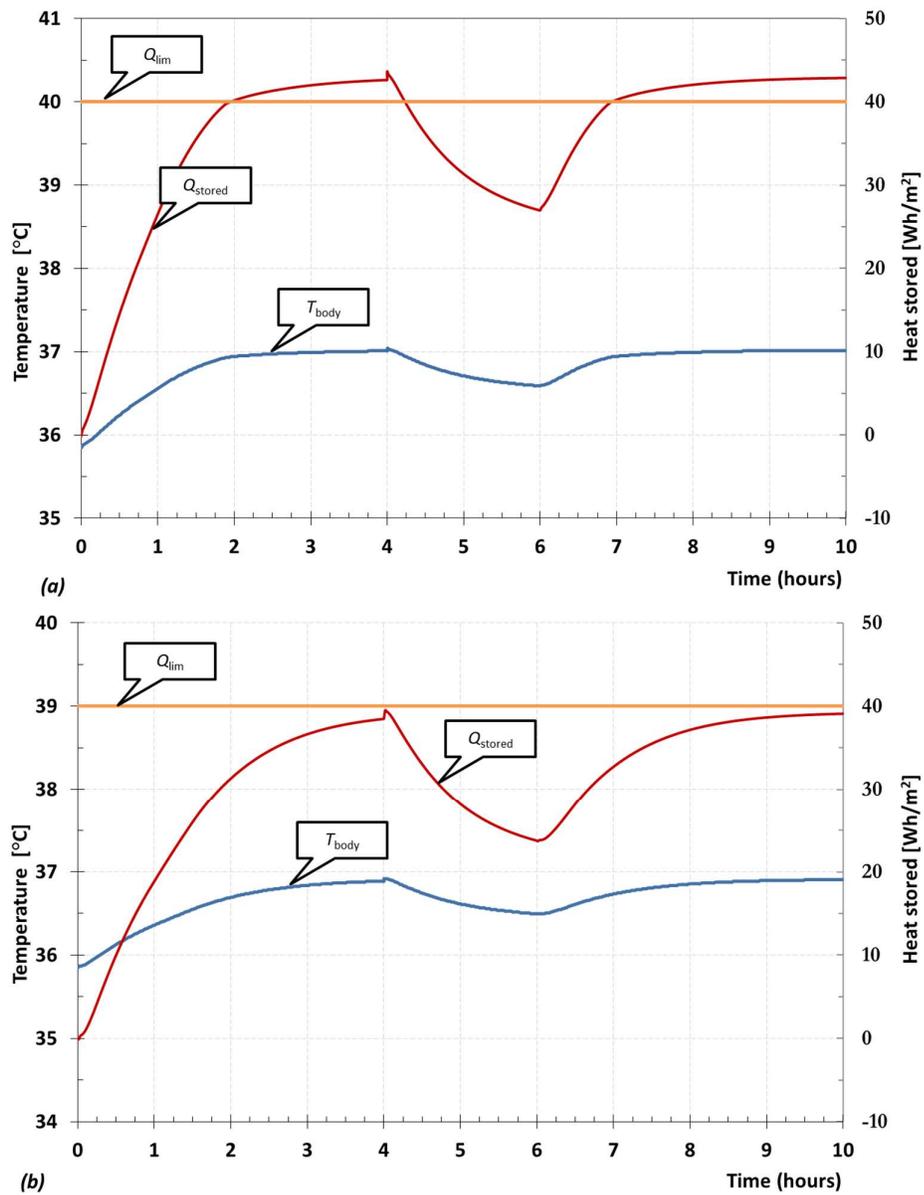


Figura 4.3: Evolução do calor acumulado pelo corpo do indivíduo ao longo do dia de trabalho numa zona de manufatura em ambiente frio: (a) situação de vestuário real; (b) situação de vestuário 30 % menos isolante.

Os indicadores comumente utilizados para representar o nível de conforto sentido por cada pessoa são os índices PMV (*Predicted Mean Vote*), PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied people*) e Draught (ISO 7730, 2005; ASHRAE 55, 2010). O índice PMV representa uma previsão da sensação térmica percebida por cada indivíduo e funciona segundo uma escala de 7 níveis (+3 → muito quente; +2 → quente; +1 → ligeiramente quente, 0 → Neutro (muito confortável); -1 → ligeiramente frio; -2 → frio; -3 → muito frio). O índice PPD, representa a percentagem de indivíduos insatisfeitos com a situação térmica em que se encontram. O Draught representa a percentagem de pessoas desconfortáveis devido a correntes de ar e à turbulência do mesmo. O software HuTheReg determina os valores destes três indicadores recorrendo aos algoritmos sugeridos pelas normas internacionais ISO 7730 (2005) e ASHRAE 55 (2010).

Apresenta-se, na Figura 4.4, a evolução com o tempo dos índices PMV, PPD e Draught para a situação de postos de trabalho de manufatura em ambiente frio para as situações do trabalhador usando o vestuário real (Figura 4.4(a)) e para a situação de ele estar vestido com roupa que promove 30% menos de isolamento térmico (Figura 4.4(b)).

A análise da Figura 4.4(a), permite concluir que a nível do índice PMV, os trabalhadores se sentem confortáveis com o ambiente térmico que os rodeia, com os valores registados a apresentarem sempre no intervalo entre -1 e 1. Torna-se interessante o facto de ser durante o período de almoço que os trabalhadores tendem a sentir-se ligeiramente frescos. O facto, de durante este período o nível de vestuário e o nível de atividade, sobretudo este último, diminuírem (considera-se que despem o casaco e se encontram sentados em descanso) leva a essa sensação térmica. É, portanto, normal que durante os períodos de transição entre períodos de trabalho e período de almoço se verifiquem as maiores oscilações no PPD, atingindo-se um pico de 85,23% de indivíduos insatisfeitos.

A Figura 4.4(b) mostra que a diminuição do nível de vestuário em 30 % não se apresenta como um fator negativo para os trabalhadores, pelo contrário. A curva evolutiva do PMV apresenta-se mais estável neste caso, assim como o indicador PPD, que apresenta picos de oscilação ligeiramente mais baixos, atingindo o valor de pico máximo de 82,76 % de indivíduos insatisfeitos.

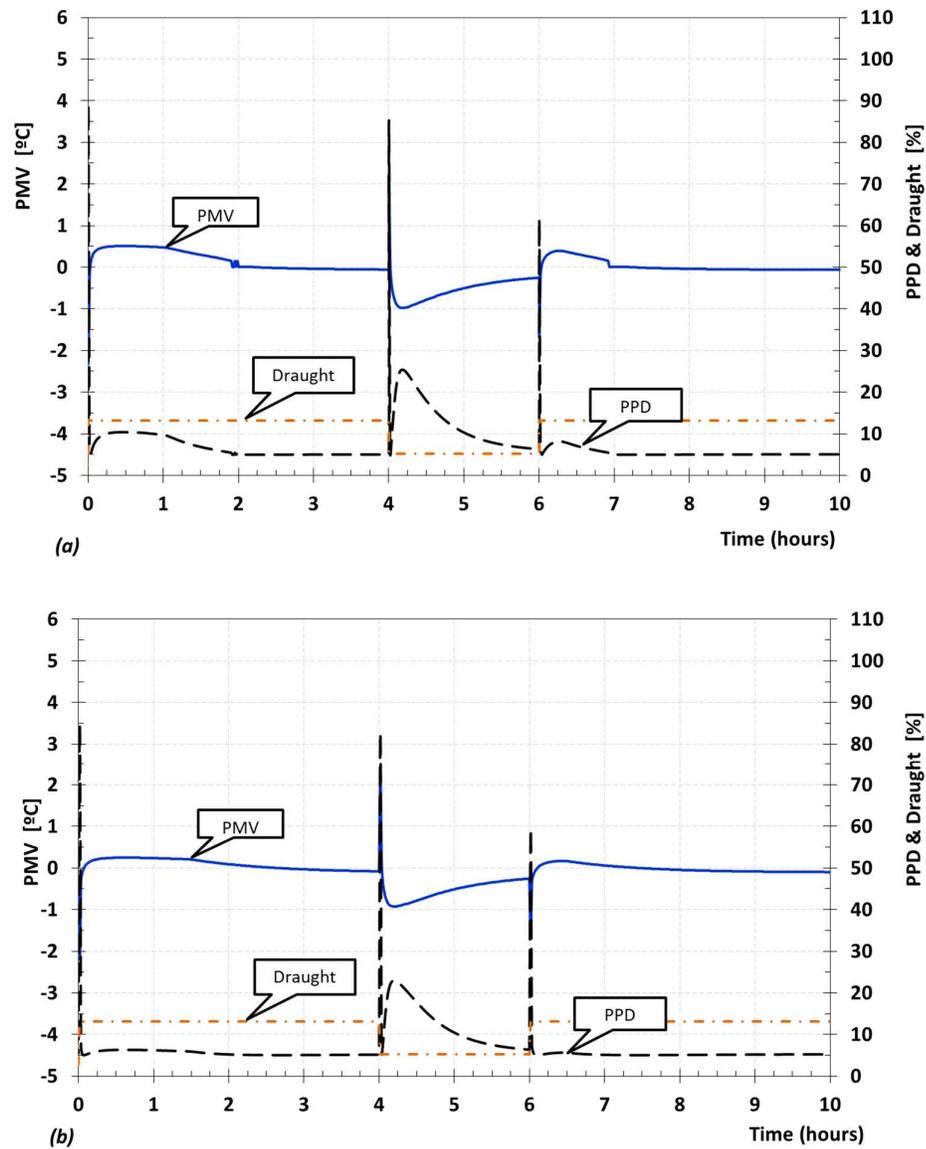


Figura 4.4: Evolução dos índices PMV e PPD relativos ao indivíduo durante o dia de trabalho numa zona de manufatura em ambiente frio: (a) situação de vestuário real; (b) situação de vestuário 30 % menos isolante.

4.2. Zonas de Expedição e Comércio em Ambiente Frio

Além das zonas de manufatura, o presente estudo recai também sob as zonas de expedição e comércio. Nestes locais, os trabalhadores também se encontram sujeitos a ambientes cujas temperaturas se podem tornar potencialmente nefastas.

Os parâmetros identificados nos trabalhos de campo de Oliveira et al. (2008a, 2008b, 2011, 2014) relativos ao trabalhador e ao ambiente térmico para as zonas de expedição e comércio com ambiente térmico frio encontram-se indicados nas Tabelas 3.3 e 3.4.

Apresentam-se na Figura 4.5 a evolução com o tempo das temperaturas do hipotálamo (T_{hyp}), retal (T_{rectal}), média do corpo (T_{body}) e mínima da pele ($T_{skin-min}$), para as situações de vestuário real (Figura 4.5(a)) e de vestuário 30 % menos isolante (Figura 4.5(b)). Na Figura 4.5 encontram-se também marcadas as temperaturas do hipotálamo em que pode ocorrer introversão por frio ($T_{hyp} \leq 34$ °C) e em que pode ocorrer introversão por calor ($T_{hyp} \geq 39$ °C).

Tal como no caso das zonas de manufatura em ambiente frio, também nas zonas de expedição e comércio com ambiente frio a temperatura do hipotálamo não se aproxima dos valores críticos de referência para a ocorrência de introversão, nem por calor nem por frio. A principal diferença entre os gráficos representativos destas duas situações reside nos valores máximos atingidos (37,14°C no caso das zonas de manufatura e 37,50°C para o caso das zonas de expedição).

Assim sendo, será possível também cogitar uma redução do isolamento do vestuário disponível semelhante à realizada para as zonas de manufatura. Como podemos verificar analisando a Figura 4.5(b), uma redução de 30% do isolamento térmico intrínseco do vestuário não coloca em causa bem-estar físico dos trabalhadores. Uma vez mais, a temperatura do hipotálamo apresenta valores bem longe dos valores críticos de referência (1,73°C abaixo do limiar de ocorrência de introversão por calor). A principal consequência desta redução da resistência térmica do vestuário é a diminuição da temperatura mínima da pele atingida (reduz dos 29,19°C para os 28,76°C). No entanto, essa diminuição não representa perigos de maior para os operários.

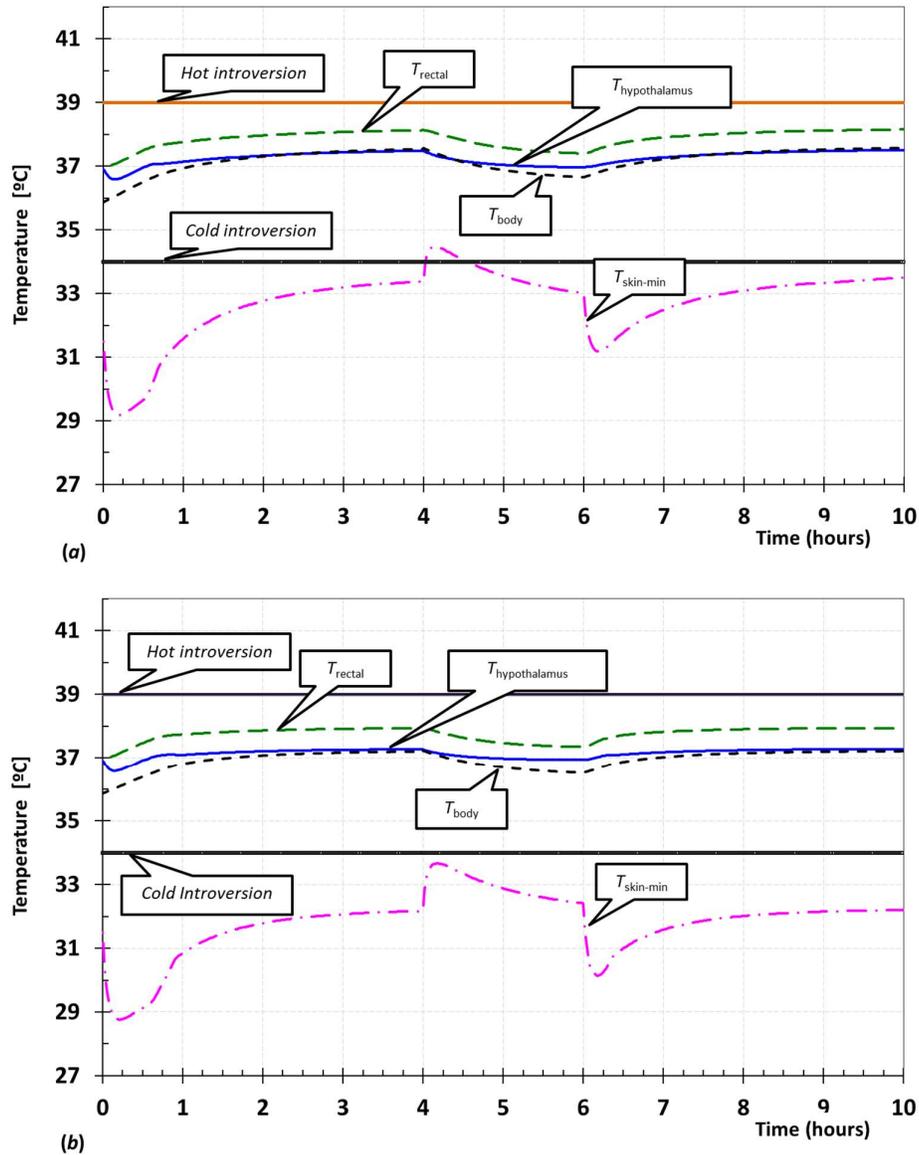


Figura 4.5: Evolução da temperatura do hipotálamo e da temperatura retal do indivíduo ao longo do dia de trabalho numa zona de expedição e comércio em ambiente frio: (a) situação de vestuário real; (b) situação de vestuário 30 % menos isolante.

A importância do trabalho manual, também realizado nestes locais, leva à análise da evolução da temperatura da pele das mãos ($T_{skin-hands}$). Essa evolução é apresentada na

Figura 4.6, para a situação de vestuário real (Figura 4.6(a)) e para a situação de vestuário com menos 30% de isolamento térmico intrínseco (Figura 4.6(b)).

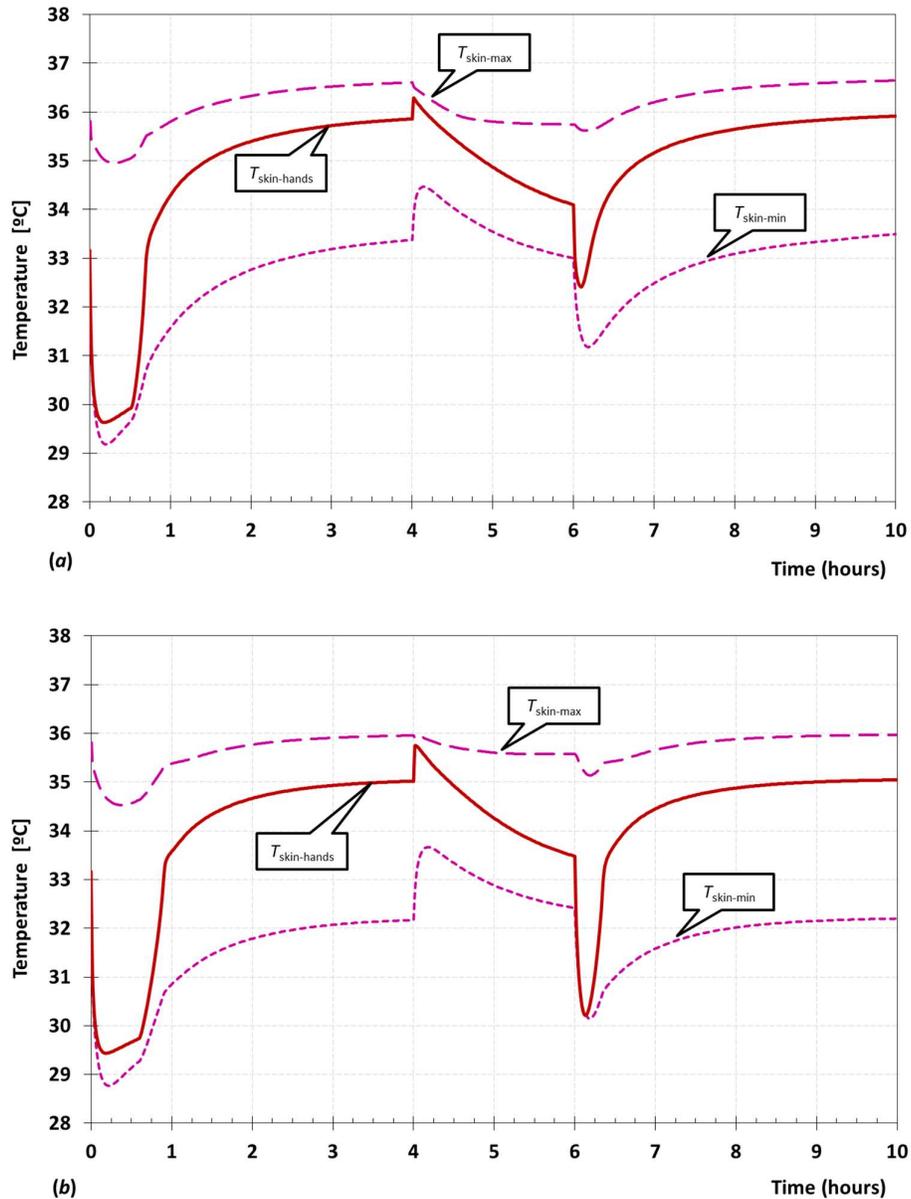


Figura 4.6: Evolução da temperatura da pele das mãos do indivíduo ao longo do dia de trabalho numa zona de expedição e comércio em ambiente frio: (a) situação de vestuário real; (b) situação de vestuário 30 % menos isolante.

A evolução ao longo do tempo da $T_{skin-hands}$ apresenta uma estrutura idêntica em ambas as situações. A principal diferença é que no caso do vestuário com menos resistência térmica (Figura 4.6(b)) os valores são ligeiramente menores do que no caso de vestuário real (Figura 4.6(a)). A temperatura da pele das mãos desce rapidamente no início dos períodos de trabalho, segue-se uma subida intensa e depois uma subida suave. O valor de $T_{skin-hands}$ desce suavemente ao longo das 2 horas do período de recuperação. O valor mínimo observado de $T_{skin-hands}$ é de cerca de 29°C, pelo que está substancialmente afastado do valor em que pode ocorrer dor na pele (18°C). No entanto, é de realçar que nas simulações não foi considerada a situação de contacto direto da pessoa com superfícies muito frias, nomeadamente com produtos congelados. A ocorrer, isto levaria a temperaturas da pele das mãos substancialmente inferior.

Apresenta-se na Figura 4.7 a evolução comparativa entre o calor acumulado (Q_{stored}) e a temperatura média corporal (T_{body}) para o caso das zonas de expedição e comércio com ambiente frio, para as situações de vestuário real (Figura 4.7(a)) e de vestuário com menos 30% de isolamento térmico intrínseco (Figura 4.7(b)).

Analisando a Figura 4.7 verifica-se que, em ambas as situações, o calor acumulado (Q_{stored}) aumenta continuamente durante os períodos de trabalho, de modo mais intenso no início e de modo mais suave no fim, atingindo o seu valor máximo no final dos mesmos (cerca de 60 Wh/m² para o caso da Figura 4.7 (a) e cerca de 51 Wh/m² para o caso da Figura 4.7 (b)). O valor de Q_{stored} sofre uma redução significativa durante o período de repouso (cerca de 28 Wh/m² para o caso da Figura 4.7 (a) e cerca de 24 Wh/m² para o caso da Figura 4.7 (b)), mesmo assim, a mesma não é suficiente para se aproximar do valor verificado no início do primeiro período de trabalho (-0,12 Wh/m² em ambas as situações). Comparando os valores representados na Figura 4.7(a) com os da Figura 4.7(b), verifica-se que a redução em 30% do isolamento térmico do vestuário leva a uma nítida redução do valor do calor acumulado, sugerindo um menor grau de stress térmico do trabalhador.

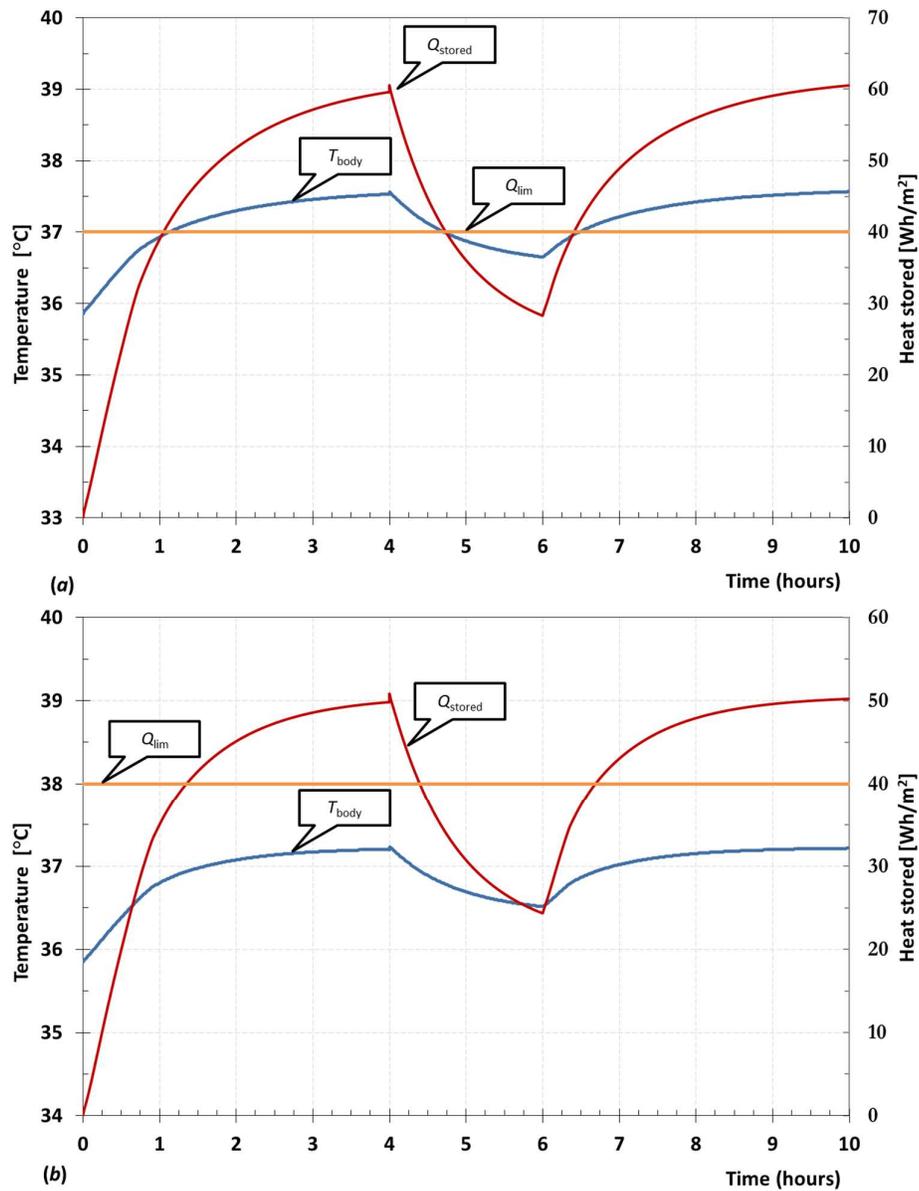


Figura 4.7: Evolução calor acumulado ao longo do dia de trabalho pelo corpo de um indivíduo numa zona de expedição e comércio em ambiente frio: **(a)** situação de vestuário real; **(b)** situação de vestuário 30 % menos isolante.

Em ambas as situações o valor de Q_{stored} ultrapassa os 40 Wh/m^2 (Q_{lim}), o que é indicativo de que é atingida uma situação de stress térmico por excesso de calor. No entanto, o excesso de calor é substancialmente maior na situação de vestuário real (Figura 4.7(a)) do que na situação de vestuário com menos 30% de isolamento térmico (Figura 4.7(b)), cerca de 9 Wh/m^2 . No primeiro caso (Figura 4.7(a)) o valor de Q_{stored} ultrapassa os 40 Wh/m^2 ao fim de cerca de 64 minutos no primeiro período de trabalho e ao fim de cerca de 25 minutos no segundo período de trabalho, enquanto no segundo caso (Figura 4.7(b)) isso leva um pouco mais de tempo a acontecer, mais especificamente, ao fim de cerca de 82 minutos e cerca de 42 minutos, respetivamente. Logo, o uso de um vestuário com isolamento térmico inferior ao atualmente utilizado é certamente benéfico.

Apresenta-se, na Figura 4.8, a evolução com o tempo dos índices PMV, PPD e Draught para a situação de trabalho em zonas de expedição e comércio com ambiente frio para as situações do trabalhador usando o vestuário real (Figura 4.8(a)) e para a situação de ele estar vestido com roupa que promove 30% menos de isolamento térmico (Figura 4.8(b)).

Neste caso, e como podemos verificar na Figura 4.8(a, b) há 2 períodos que se destacam. No período inicial, quando o trabalhador inicia a sua jornada de trabalho, com o aumento do nível de atividade metabólica, este sente-se ligeiramente quente. O outro período de destaque, será a pausa para almoço. Neste período a diminuição do vestuário e do nível de atividade metabólica, leva a que o trabalhador de sinta ligeiramente fresco. Por consequência, é nestes períodos que se verifica o maior valor de PPD. A situação hipotética de diminuição em 30% do nível de isolamento do vestuário apresenta uma evolução muito semelhante à de vestuário real. No entanto, a utilização de vestuário com menos resistência térmica leva a que os picos dos valores de PMV e de PPD sejam muito menos acentuados.

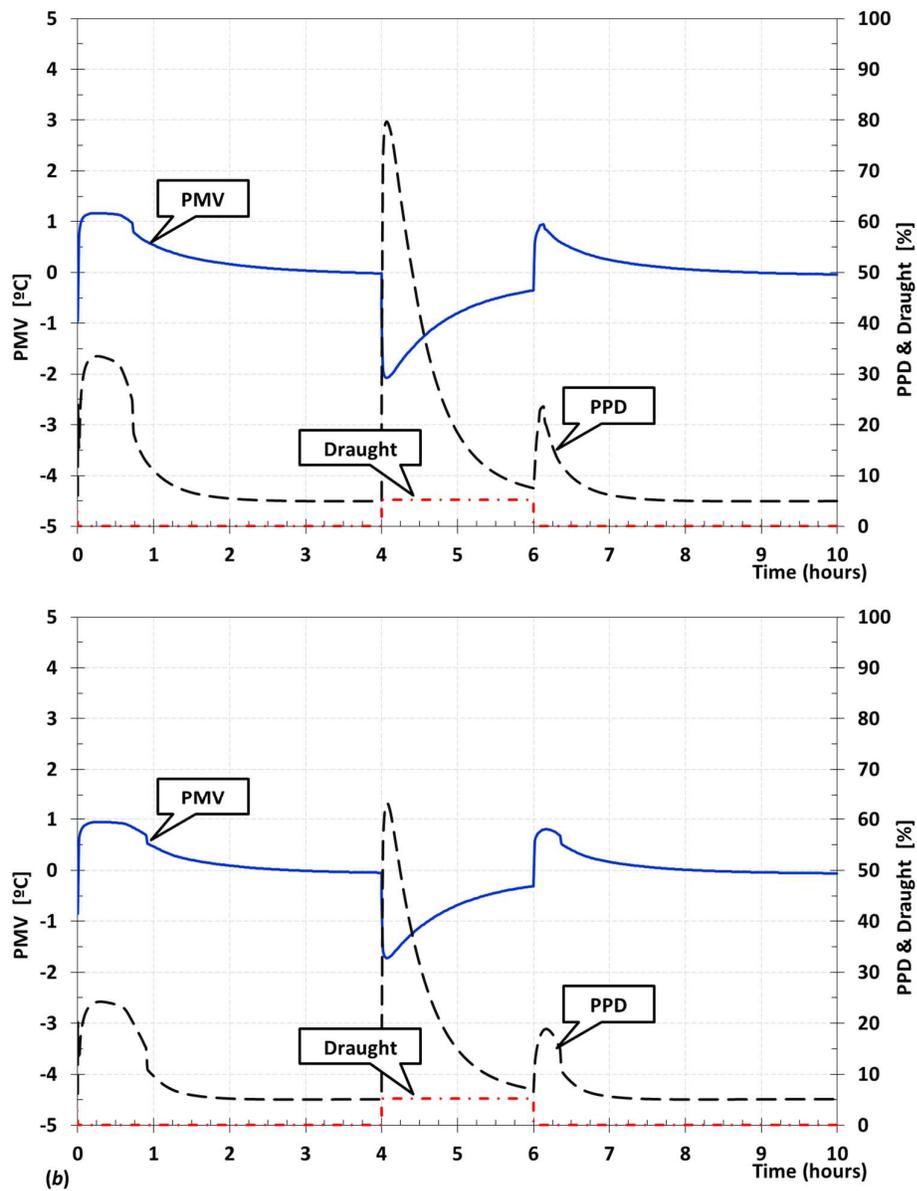


Figura 4.8: Evolução dos índices PMV, PPD e Draught relativos a um indivíduo ao longo do dia de trabalho numa zona de expedição e comércio em ambiente frio: (a) situação de vestuário real; (b) situação de vestuário 30 % menos isolante.

4.3. Discussão e Análise Comparativa

As zonas de manufatura em ambiente frio apresentam-se, à partida, como a situação mais desfavorável, uma vez que a temperatura do ar é mais baixa do que nas zonas de expedição e comércio com ambiente frio. No entanto, quando se realiza uma comparação da evolução da temperatura retal e da do hipotálamo dos trabalhadores em cada um destes ambientes, verifica-se que se obtém valores bastante semelhantes, nomeadamente nas temperaturas do hipotálamo. Isto deve-se a que, em termos de termorregulação, o efeito das menores temperaturas do ambiente térmico das zonas de manufatura é compensado por um maior nível de atividade do trabalhador e pelo uso de vestuário com maior resistência térmica.

Os valores previstos para a temperatura do hipotálamo revelaram que em nenhuma situação existe o risco de serem atingidas situações de introversão por excesso de frio ou de calor ou de uma patologia grave (choque de calor ou de frio, ou danos cerebrais, ou morte). Sobre este ponto de vista, trabalhar nas zonas com ambientes termicamente frios consideradas neste estudo é seguro.

Contrariamente ao que se esperava, a evolução do valor do calor acumulado no corpo humano revela a possibilidade de ser atingida a situação de stress térmico por excesso de calor e não por excesso de frio. Isto está diretamente relacionado com o elevado nível de esforço físico exigido aos trabalhadores para realizar as tarefas requeridas e com o recurso a vestuário com uma resistência térmica superior ao recomendado. Isto foi demonstrado pelo menor valor de calor acumulado nas situações em que o isolamento térmico intrínseco do vestuário foi reduzido em 30%.

As previsões numéricas obtidas com recurso ao *HuTheReg* revelaram que a possibilidade de serem atingidas situações de stress térmico por excesso de calor ($Q_{stored} \geq 40 \text{ Wh/m}^2$) no caso das zonas de manufatura em ambiente frio quando o trabalhador utiliza o vestuário real, mas não quando utiliza um vestuário com menos 30% de isolamento térmico. No caso das zonas de expedição e comércio com ambiente frio, os valores globais de temperatura do corpo do trabalhador, e correspondentemente do calor

acumulado no seu corpo, são substancialmente superiores aos observados no caso das zonas de manufatura em ambiente frio. Assim, no caso das zonas de expedição e comércio com ambiente frio, a possibilidade de serem atingidas situações de stress térmico por excesso de calor existe quer quando o trabalhador utiliza o vestuário real quer quando utiliza um vestuário com menos 30% de isolamento térmico.

É claro que, ao contrário do considerado nas simulações, os trabalhadores podem ir ajustando o vestuário que estão a usar ao estado térmico que estão a sentir, retirando peças de roupa sempre que sentirem calor ou vestindo-as sempre que sentirem frio. No entanto, esta prática pode dar maus resultados nas situações consideradas neste trabalho, pois existem pessoas que se despem quase completamente sempre que sentem calor e vestem-se ao máximo sempre que sentem frio, o que leva a um permanente “ping-pong” do estado térmico do seu corpo. Mas se for efetuada de modo racional, esta prática é altamente recomendável. De qualquer modo, este aspeto não está relatado nas publicações sobre os trabalhos de campo realizados por Oliveira et al. (2008a, 2014). Outro aspeto que não foi viável analisar é a adaptação das pessoas aos ambientes, neste caso moderadamente frios, quando as mesmas são expostas a eles de modo repetitivo por longos períodos de tempo.

5. CONCLUSÕES

O trabalho apresentado neste relatório pretendia atingir dois objetivos, ambos relacionados com o trabalho de pessoas em ambientes moderadamente frios: o primeiro dos quais era avaliar o stress térmico a que os trabalhadores de postos de manufatura e os de zonas de expedição e comércio se encontram sujeitos; o segundo era identificar potenciais situações de perigo relacionadas com a exposição, por tempos prolongados, destes trabalhadores aos ambientes frios típicos destes locais de trabalho. Para tal, contou-se com dados e informações relativas a situações reais da indústria portuguesa, obtidos nos trabalhos de campo realizados por Oliveira et al. (2008a, 2014).

Os resultados apresentados foram obtidos por simulação numérica recorrendo para o efeito ao software *HuTheReg*, de simulação da resposta termofisiológica do corpo humano.

Ao contrário do que se estava à espera, as previsões numéricas revelaram a possibilidade de serem atingidos níveis de stress térmico por excesso de calor e não por excesso de frio. Isto ocorre em ambos os ambientes de trabalho considerados desde que os trabalhadores usem o vestuário com o isolamento térmico (real) identificado na sequência dos trabalhos de campo que serviram de base a este estudo. O nível de stress térmico atingido é maior no caso do trabalho em zonas de expedição e comércio do que no caso de trabalho em zonas de manufatura.

Constatou-se que é benéfico o uso de um vestuário com um isolamento térmico intrínseco 30% inferior ao real, pois leva a menores valores do calor acumulado no corpo, logo faz com que o nível de stress térmico por excesso de calor seja menor.

Embora se tenha demonstrado que são atingidos níveis térmicos do corpo humano caracterizados como correspondentes a stress térmico por excesso de calor, os valores previstos para a temperatura do hipotálamo revelaram que em nenhuma das situações consideradas existe o risco de ocorrência de introversão por excesso de frio ou de calor ou de uma patologia mais grave (choque de calor ou de frio, ou danos cerebrais, ou morte).

Sobre este ponto de vista, trabalhar nas zonas com ambientes termicamente frios consideradas neste estudo é seguro. Ou seja, “não mata, mas mói”.

Conclui-se assim que as condições de trabalho que ocorrem na indústria portuguesa de manufatura em ambientes frios e as suas respetivas zonas de expedição e comércio são seguras e minimamente aceitáveis sob o ponto de vista do stress térmico dos trabalhadores. Mesmo assim, há uma grande margem para eventuais melhoramentos no futuro. Um desses melhoramentos passaria por realizar um estudo de otimização dos níveis de isolamento do vestuário, por forma a manter o conforto térmico dos trabalhadores próximo do ideal.

É, de salientar que o software utilizado na previsão do comportamento termofisiológico dos trabalhadores dos postos de trabalho em análise assenta num modelo puramente matemático. Como tal, as suas previsões representam resultados médios para um elevado número de pessoas. Mas cada pessoa tem uma resposta termofisiológica diferente ao frio e ao calor. Logo, a média não é suficientemente representativa da totalidade dos indivíduos. Como tal, as previsões numéricas do estado termofisiológico das pessoas devem ser complementadas com uma avaliação subjetiva de cada pessoa sobre o seu próprio estado térmico e, eventualmente, acompanhada de medições da temperatura de zonas específicas do seu corpo e da monitorização das suas funções respiratória e cardiológica.

REFERÊNCIAS

- Ahmad T., Rashid T., Khawaja H., Moatamedi, M. (2017), Study of the required thermal insulation (IREQ) of clothing using infrared imaging, *International Journal of Multiphysics*, vol.11, nº 4, pp. 413-426.
- ASHRAE 55 (2010), Thermal environmental conditions for human occupancy, *ASHRAE standard*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- ASHRAE (2013), *ASHRAE handbook of fundamentals*, chapter 9 - thermal comfort, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Cauthen G. (2002), Preventing cold-related illness, *Loss Bulletin*, Oklahoma Municipal Assurance Group.
- Fanger P.O. (1967), Calculation of thermal comfort: introduction of a basic comfort equation. *ASHRAE Transactions*, vol. 73, nº 2: III.4.1.
- Fiala D., Lomas K.J., Stohrer M. (1999), A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions - the passive system, *Journal of Applied Physiology*, vol. 87, pp. 1957-1972.
- Fiala D., Lomas K.J., Stohrer M. (2001), Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions, *International Journal of Biometeorology*, vol. 45, pp. 143-159.
- Gavhed D., Holmér I (1998), Thermal responses at three low ambient temperatures: validation of the duration limited exposure index, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 21, pp. 465-474.
- Griefahn B. (2000), Limits and possibilities to improve the IREQ cold stress model (ISO/TR 11079). A validation study in the field. *Applied Ergonomics*, vol. 31, pp. 423-431.
- Hardy J.D., Wolf H.G., Goodell H. (1952), Pain sensations and reactions. *Williams and Wilkins*, Baltimore.
- Holmér I. (1984), Required clothing insulation (IREQ) as an analytical index of cold stress, *ASHRAE Transactions*, vol. 90, pp. 1116-1128.

-
- Holmér I. (2009), Evaluation of cold workplaces: an overview of standards for assessment of cold stress, *Industrial Health*, vol. 47, 228-234.
- Huizenga C., Hui Z., Arens E. (2001), A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments, *Building and Environment*, vol. 36, pp. 691-699.
- ISO 7730 (2005), 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, *ISO standard*, Genève, Switzerland.
- ISO 9920 (2007), Ergonomics of the thermal environment – estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble, *ISO standard*, Genève, Switzerland.
- ISO 11079 (2007). Ergonomics of the thermal environment - Determination and interpretation of cold stress when using required clothing insulation (IREQ) and local cooling effects, *ISO standard*, Genève, Switzerland.
- ISO 11399 (1995). Ergonomics of the thermal environment – principles and application of relevant international standards, *ISO standard*, Genève, Switzerland.
- Kim T., Fujita M., Hashiguchi N., Tochihara Y. (2005), Physiological responses and performance during exposure to severe cold, In: Holmér I, Kuklane K and Gao G (eds), 11th *International Conference on Environmental Ergonomics*, ICEE 2005, 22-26 May, Ystad, Sweden, pp. 270-273.
- Nielsen R. (1998), Characteristics of cold workplaces in Denmark, In: Holmér I and Kuklane K (eds), *International Symposium on Problems with Cold Work*. National Institute for Working Life, 16-20 November 1997, Stockholm, Sweden, pp. 16-18.
- Oliveira A.V.M., Gaspar A.R., Quintela D.A. (2008a), Occupational exposure to cold thermal environments: a field study in Portugal, *European Journal of Applied Physiology*, vol. 104, pp. 207-214.
- Oliveira A.V.M., Gaspar A.R., Quintela D.A. (2008b), Measurements of clothing insulation with a thermal manikin operating under the thermal comfort regulation mode: comparative analysis of the calculation methods, *European Journal of Applied Physiology*, vol. 104, pp. 679-688.
- Oliveira A.V.M., Gaspar A.R., Quintela D.A. (2011), Dynamic clothing insulation: measurements with a thermal manikin operating under the thermal comfort regulation mode, *Applied Ergonomics*, vol. 42, n° 6, pp. 890-899.
-

-
- Oliveira A.V.M., Gaspar A.R., Raimundo A.M., Quintela D.A. (2014), Evaluation of occupational cold environments: field measurements and subjective analysis, *Industrial Health*, vol. 52, pp. 262-274.
- Oliveira A.V.M., Gaspar A.R., Raimundo A.M., Quintela D.A. (2015), Assessment of thermal environments: working conditions in the Portuguese ceramic industry in 1994 and 2012. *Work*, vol. 51, nº 3, pp. 457-470.
- Raimundo A.M., Quintela D.A., Gaspar, A.R., Oliveira A.V.M. (2008), Thermophysiological response of human beings working in cold thermal environments, *7th International Thermal Manikin and Modelling Meeting*, Coimbra, Portugal, 3 – 5 September.
- Raimundo A.M., Figueiredo A.R. (2009), Personal protective clothing and safety of firefighters near a high intensity fire front, *Fire Safety Journal*, vol. 44, pp. 514-521.
- Raimundo A.M., Quintela D.A., Gaspar A.R., Oliveira A.V.M. (2012), Development and validation of a computer program for simulation of the human body thermophysiological response, *2nd Portuguese Meeting in Bioengineering*, 23 to 25 February 2012, Coimbra, Portugal, Portuguese chapter of IEEE EMBS.
- Raimundo A.M., Pereira C.D., Quintela D.A., Oliveira A.V.M. (2015a), Human body thermoregulation - test and validation of a computer program, *SHO-2015: International Symposium on Occupational Safety and Hygiene*, Guimarães, Portugal, 12-13 February 2015, Paper #25.
- Raimundo A.M., Oliveira A.V.M., Gaspar A.R., Quintela D.A. (2015b), Thermal conditions in freezing chambers and prediction of the thermophysiological responses of workers, *International Journal of Biometeorology*, vol. 59, pp. 1623-1632.
- Raimundo A. M. (2016), *Huthereg - Software de simulação do comportamento termofisiológico do corpo humano*, DEM, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Raimundo A.M., Oliveira A.V.M., Quintela D.A. (2018), Assessment of a human body thermoregulation software to predict the thermophysiological response of firefighters, *Advances in Forest Fire Research 2018 - D. X. Viegas (Ed.) Chapter 3 – Fire management*.

-
- Ribeiro M.D.B. (2016), Avaliação de técnicas de melhoria do comportamento termofisiológico do corpo humano em situações de desporto, *Dissertação de Mestrado integrado em Engenharia Mecânica*, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Ronda R.O. (2017), Comportamento termofisiológico do corpo humano em situações de exposição a ambientes quentes típicos das indústrias cerâmica e vidreira, *Dissertação de Mestrado integrado em Engenharia Mecânica*, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Stolwijk J.A.J. (1971), A mathematical model of physiological temperature regulation in man, *NASA contractor report CR-1855*, NASA, Washington DC
- Tanabe S., Kobayashi K., Nakano J., Ozeki Y., Konishi M. (2002), Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD), *Energy and Buildings*, vol. 34, pp. 637-646.
- Tochihara Y. (1998), Work in artificially cold environments, In: Holmér I. and Kuklane K. (eds), *International Symposium on Problems with Cold Work*, National Institute for Working Life, 16-20 November 1997, Stockholm, Sweden, pp. 13-15.
- WHO (1969), Health factors involved in working under conditions of heat stress, Technical Report Series n° 412, World Health Organization, Geneva.