



**Luís Carlos dos
Santos Pereira**

Conforto e desconforto térmico numa nave industrial



**Luís Carlos dos
Santos Pereira**

**Conforto e desconforto térmico numa nave industrial
Estudo exploratório**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Física, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Mário de Almeida Rodrigues Talaia, Professor Auxiliar com nomeação definitiva do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

o júri

presidente

Doutor João Filipe Calapez de Albuquerque Veloso
Professor Auxiliar, Departamento de Física da Universidade de Aveiro

Doutora Liliana do Carmo Santiago Fernandes Amado Caramelo
Professora Auxiliar, Departamento de Física da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Doutor Mário de Almeida Rodrigues Talaia
Professor Auxiliar, Departamento de Física da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Gostaria de agradecer em primeiro lugar e especialmente ao Professor Doutor Mario Talaia, pela extrema confiança depositada em mim, pela dedicação incansável, pelos grandes conselhos e conhecimentos transmitidos e pela sábia orientação que me prestou, de extrema importância, para a concretização desta investigação.

Aos meus pais e em especial ao meu irmão, pelo constante apoio moral e incentivo dado ao longo desta investigação independentemente da distância a que se encontram.

À Priscillia Rodrigues pelo apoio dado e pela revisão de textos.

Ao Andreas Del Furia pela ajuda prestada e pelos incentivos dados nas horas de maior cansaço.

E por fim ao Engenheiro Nuno de Sousa Alves pelo interesse demonstrado, pela disponibilidade e pela oportunidade por ele providenciada permitindo a realização deste estudo, numa nave industrial.

A todos, um muito obrigado.

palavras-chave

Conforto / Desconforto térmico, Ambiente quente, WBGT, EsConTer, PMV, PPD, ITH, ITE, diagrama de conforto / desconforto WMO

resumo

Num mundo industrial cada vez mais competitivo, onde a produção de bens de consumo é constante e o seu ritmo de produção aumenta diariamente, não se aceita nada mais que a pura “perfeição”. É cada vez exigida mais e melhor “performance” do factor humano (representando uma peça fundamental para o funcionamento das indústrias) e, os índices de produtividade e de qualidade exigem do trabalhador melhores ritmos de trabalho para que os sistemas automatizados e/ou robotizados tenham um desempenho cada vez mais eficiente. O problema está numa economia de mercado onde a alta produção aliada à qualidade é factor determinante para a sobrevivência da indústria.

Devido a esta crescente pressão sobre o factor humano, a indústria tem recorrido à ciência para otimizar este factor, pois é reconhecido que o bem-estar de um trabalhador pode condicionar o produto final de uma empresa industrial.

Esta investigação é uma contribuição que pretende mostrar que é possível conhecer, numa indústria de grande dimensão, valores de conforto / desconforto em locais onde estão localizados postos de trabalho.

São apresentados alguns estudos de caso em diferentes dias e são consideradas as zonas de maior vulnerabilidade.

Os resultados obtidos foram valorizados através da aplicação de diferentes índices térmicos de aplicação fácil e através das orientações traçadas pelas ISO 7726/1984, 7730/2005 e ANSI/ASHRAE 55/2004.

Também se realizou, num local diferente, um estudo em que se aplicou um balanço energético ao ser humano e valorizou-se valores publicados na literatura da especialidade.

Os resultados obtidos mostraram que a metodologia usada é correcta e contribuíram para um melhor conhecimento dos padrões que afectam uma nave industrial e, suscitaram estratégias de intervenção para a melhoria do espaço onde trabalhadores estão presentes.

keywords

Thermal Comfort / Discomfort, Warm Environment, WBGT, EsConTer, PMV, PPD, ITH, ITE, Diagram of Comfort / Discomfort WMO

abstract

In an industrial world increasingly competitive where the production of consumption goods is constant and the pace of production increases every day and where cannot be accepted nothing more than sheer "perfection". It's increasingly demanded more and better "performance" from the human factor (represents a key factor to the industries function) and the indexes of productivity and quality require from the worker better work rates so that the automated systems and / or robotic systems can have an increasing performance. The problem lies in a market economy where high production is based on quality factor for the survival of the industry.

Due to this increasing pressure on the human factor the industry has used science to optimize this factor, because it's recognized that the welfare of a worker may condition the industry end product.

This research is a contribution that aims to evaluate, in a large dimension industry, values of comfort / discomfort in places where jobs are located.

There are presented some case studies on different days and are considered the most vulnerable areas.

The results were valued through the application of different thermal indices of easy application and through the guidelines of ISO 7726/1984, 7730/2005 and ANSI/ASHRAE 55/2004.

It was made also, in a different place, a study in which an energy balance was applied to the human being, and values published in the literature of the specialty were taken into consideration.

The results show that the methodology was correct and contributed to a better understanding of the patterns that affect an industrial building and sparked intervention strategies to improve the area where workers are present.

mots-clés

Confort/Inconfort thermique, ambiance chaude, WBGT, EsConTer, PMV, PPD, ITH, Diagramme de confort/inconfort WMO.

résumé

Dans un monde industriel de plus en plus compétitif où la production de biens de consommation est constante et son rythme de production augmente quotidiennement, rien de plus que la «perfection» est acceptée. Une plus grande et une meilleure «performance» du facteur humain est de plus en plus exigée (représentant une pièce fondamentale pour le fonctionnement des industries) et les indices de productivité et de qualité exigent du travailleur un meilleur rythme de travail pour que les systèmes automatisés et/ou robotisés aient une performance plus efficace. Le problème est que dans une économie de marché où une haute production liée à la qualité est un facteur déterminant pour la survie de l'industrie.

Due à cette pression croissante sur le facteur humain l'industrie a eu recours à la science pour optimiser ce facteur, il est reconnu que le bien-être d'un travailleur peut conditionner le produit final d'une entreprise industrielle.

Cette recherche est une contribution qui prétend évaluer, dans une industrie de grande dimension, des valeurs de confort/inconfort dans des zones où sont localisées des postes de travail.

Certaines études de cas sont présentées au long de différents jours et les zones de plus grande vulnérabilité sont considérées.

Les résultats obtenus ont été valorisés à travers de l'application de différents indices thermiques d'application facile et au travers des orientations tracées par les ISO 7726/1984, 7730/2005 et ANSI/ASHRAE 55/2004.

Une étude dans laquelle un bilan énergétique a été appliqué à l'être humain et où des valeurs publiées dans la littérature de spécialité ont été valorisées a également été faite, dans un local différent.

Les résultats obtenus montrent que la méthodologie employée a été correcte et ils ont contribué à une meilleure connaissance des modèles qui affectent une halle industrielle et suscitent des stratégies d'intervention pour l'amélioration de l'espace où il existe des travailleurs.

Parole-chiave

Conforto/ Sconforto termico, Ambiente Caldo, WBGT, EsConTer, PMV, PPD, ITH, ITE, diagramma di confort/ sconforto WMO

riassunto

In un mondo industriale sempre più competitivo, dove la produzione dei beni di consumo è costante e il suo ritmo di produzione aumenta quotidianamente, non si accetta nient'altro che la pura "perfezione". È sempre più richiesta la migliore "prestazione" del fattore umano (rappresentando una parte fondamentale per il funzionamento delle industrie) e gli indici di produttività e di qualità richiedono al lavoratore ritmi di lavoro migliori per i quali i sistemi automatizzati e/o robotizzati abbiano un rendimento sempre più efficiente. Il problema è dato da una economia di mercato dove l'alta produzione alleata alla qualità è il fattore determinante per la sopravvivenza dell'industria.

Di conseguenza a questa crescente pressione sul fattore umano l'industria è ricorsa alla scienza per ottimizzare questo fattore, è risaputo che il benessere di un lavoratore può condizionare il prodotto finale di un'impresa industriale.

Questa ricerca è un contributo che pretende di valutare, in una industria di grande dimensioni, valori di comfort e non comfort termico in aree dove sono presenti posti di lavoro.

Vengono presentati alcuni casi studio e sono considerate le zone di maggiore vulnerabilità in giorni differenti.

I risultati ottenuti sono stati analizzati attraverso l'applicazione di differenti indici termici di facile applicazione e grazie alle linee guida degli ISO 7726/1984, 7730/2005 e del ANSI/ASHRAE 55/2004.

Si realizzò, in un'altra occasione, uno studio dove si applicava un bilancio energetico all'essere umano e si valorizzarono così i valori pubblicati nella letteratura specialistica.

I risultati ottenuti mostrarono che la metodologia usata era corretta e contribuirono per una conoscenza migliore dei modelli che interessano un edificio industriale e suscitarono strategie di intervento per il miglioramento dello spazio dove sono presenti lavoratori.

| | |
|---|----|
| Índice | |
| 1. Introdução | 1 |
| 2. Condições Higrométricas | 5 |
| 2.1. ar húmido | 5 |
| 2.1.1. Equações de estado | 6 |
| 2.1.2. Termodinâmica do ar húmido..... | 7 |
| 2.1.3. Humidade relativa do ar..... | 10 |
| 2.1.3.1. Razão de Mistura | 10 |
| 2.1.3.2. Razão de mistura de saturação..... | 10 |
| 2.1.3.3. Temperatura do ponto de orvalho | 11 |
| 2.1.3.4. Humidade relativa do ar..... | 11 |
| 2.1.3.5. Temperatura de globo | 12 |
| 2.1.3.6. Temperatura média radiante | 12 |
| 2.1.3.7. Termómetro molhado natural | 12 |
| 2.1.3.8. Temperatura operativa | 12 |
| 2.1.3.9. Velocidade do ar | 13 |
| 2.1.4. Calor e Temperatura | 13 |
| 3. Conforto Térmico | 15 |
| 3.1. Introdução | 15 |
| 3.2. Índices de conforto térmico / <i>stress</i> térmico | 15 |
| 3.2.1. Índice <i>ITE</i> | 15 |
| 3.2.2. Índice <i>ITH</i> | 16 |
| 3.2.3. Índice <i>WBGT</i> | 17 |
| 3.2.4. Índice <i>EsConTer</i> | 18 |
| 3.2.5. Índices <i>PMV</i> e <i>PPD</i> | 18 |
| 3.2.6. Diagrama de conforto / desconforto da Organização Mundial de Meteorologia..... | 21 |
| 4. Metodologia | 23 |
| 4.1. Introdução | 23 |
| 4.2. Caracterização da nave industrial | 23 |
| 4.3. Matriz de postos de observação | 24 |
| 4.4. Parâmetros registados | 24 |
| 4.4.1. Instrumentos de medida usados | 24 |

| | | |
|--------|---|----|
| 4.4.2. | Construção de algoritmo “A” | 25 |
| 4.4.3. | Construção do algoritmo “B” | 26 |
| 5. | Resultados e discussão | 29 |
| 5.1. | Introdução | 29 |
| 5.2. | Índices <i>ITH</i> e <i>EsConTer</i> | 29 |
| 5.2.1. | Introdução | 29 |
| 5.2.2. | Resultados / considerações | 29 |
| 5.3. | Índices <i>WBGT</i> e <i>EsConTer</i> | 30 |
| 5.3.1. | Introdução | 30 |
| 5.3.2. | Resultados / considerações | 30 |
| 5.4. | Índice <i>PMV</i> e índice <i>PPD</i> | 36 |
| 5.4.1. | Introdução | 36 |
| 5.4.2. | Resultados / considerações | 37 |
| 5.5. | Aplicação da norma ISO 7730 (2005) a um posto de trabalho | 41 |
| 5.5.1. | Introdução | 41 |
| 5.5.2. | Resultados / comentários | 42 |
| 6. | Considerações finais e perspectivas futuras | 45 |
| | Bibliografia | 47 |
| | Anexos | 51 |

1. Introdução

Desde a revolução industrial que a indústria tem tentado maximizar e otimizar todos os seus processos de produção, aliando-se cada vez mais à Ciência. Um dos maiores intervenientes na produção industrial é o factor humano, o que torna estudos deste tipo de investigação de extrema importância em condições laborais. O ser humano é sensível ao meio ambiente que o rodeia, em especial às condições atmosféricas que se registam. O ser humano pode ser equiparado a um sistema termodinâmico, que produz trabalho mecânico, calor e temperatura, utilizando comida como combustível e oxigénio como matéria-prima. Este sistema delicado necessita, em condições normais de saúde, de manter uma temperatura interna corporal de cerca de 37°C, para que os órgãos vitais não deixem de funcionar convenientemente (órgãos vitais como o fígado, baço entre outros). Em situações de hipotermia ou hipertermia podem ser suscitados danos irreparáveis.

O calor gerado pelo corpo humano tem de ser igual ao calor perdido (Butera, 1998). É aceite na literatura da especialidade que o bem-estar do trabalhador num determinado local recai sobre a relação entre o equilíbrio térmico do corpo humano e a temperatura do ar húmido desse local (Riniolo & Schmidt, 2006; Zhao, *et al.*, 2009). Este equilíbrio recai sobre vários factores, nomeadamente o ambiente térmico do local de trabalho, o calor gerado através do metabolismo humano e as propriedades térmicas dos materiais que constituem as roupas usadas, entre outras (Kang, *et al.*, 2001; Huang, 2006).

A roupa representa um elemento de elevada importância no conforto térmico pois tem um impacto directo sobre o mesmo, regulando as trocas de energia sob a forma de calor tal como a massa de suor do corpo humano com o meio ambiente (Huang, 2006).

Quando em condições de conforto térmico, o corpo humano tem a capacidade de regular a sua temperatura interna através de métodos passivos e/ou evaporativos. Quando se regista uma situação de *stress* térmico extremo ou prolongado, esta torna-se insuficiente e obriga a um processo de selecção de indivíduos com boa robustez física (Kang, *et al.*, 2001; Martens, 2006).

Em indivíduos saudáveis, um sistema de regulação térmica eficiente permite ao corpo humano funcionar efectivamente em ambientes de *stress* térmico, assegurando o seu conforto (dentro de certos limites) e mantendo as suas actividades físicas e psíquicas sem prejudicar a sua saúde (Martens, 2006).

É sabido que condições de *stress* térmico reduzem os índices de produtividade e aumentam os comportamentos de risco e a probabilidade de acidentes de trabalho (Riniolo & Schmidt, 2006; O'Neal & Bishop, 2010), assim como o risco de aparecimento de doenças predominantemente cardiopulmonares (Martens, 2006; O'Neal & Bishop, 2010). Existem vários mecanismos que podem explicar o aparecimento destas doenças, como variações na pressão sanguínea (diástole e sístole) e na viscosidade sanguínea e alterações no ritmo cardíaco associados a ajustes fisiológicos à temperatura do meio ambiente (Martens, 1998, Seeley *et al.*, 2001; Davidovits, 2008).

A termorregulação é um exemplo de um processo homeostático onde a temperatura corporal interna é mantida aproximadamente a 37°C. De forma a manter a homeostasia térmica (capacidade do ser humano em regular o seu ambiente interno mantendo uma condição estável) em resposta a ambientes térmicos quentes, ocorrem processos de perda de energia sob a forma de calor por parte do corpo humano com o meio ambiente através de radiação, condução, convecção e

evaporação (a sua grande maioria através de suor). Ambientes com uma humidade relativa elevada podem reduzir severamente a eficiência das trocas de energia sob a forma de calor através de processos de evaporação, limitando-os. Em contrapartida, o corpo humano possui a capacidade de manter a sua termorregulação em ambientes quentes num intervalo de temperaturas restritas (23.9°C a 30°C) sem que esteja dependente de processos evaporativos, recorrendo a alterações no volume de sangue afluente às camadas externas da pele.

Condições térmicas que causem derivações entre 3°C a 5°C acima da temperatura interna normal (37°C) resultam numa deterioração da performance física e mental, podendo resultar em insolações e, em casos extremos, até mesmo a morte (caso a homeostasia não seja reposta). A homeostasia térmica é alcançada equilibrando as perdas e ganhos de energia sob a forma de calor do corpo humano através de uma variedade de comportamentos fisiológicos e mecanismos comportamentais. Em resposta a situações de *stress* térmico o corpo humano aumenta o suor produzido, a vasodilatação, o ritmo cardíaco e reduz o volume sanguíneo nos órgãos internos, tal como uma série de respostas comportamentais como a ingestão de fluidos, a remoção de peças de vestuário e até mesmo mudanças de postura, resultando na diminuição do nível de actividade física pois os movimentos musculares aumentam a produção de energia sob a forma de calor (Riniolo & Schmidt, 2006).

Os estudos sobre os efeitos de *stress* térmico no ser humano tiveram início durante a Segunda Guerra Mundial quando a Marinha Real Britânica investigou o efeito do calor em operadores de telégrafos. O objectivo foi identificar os compartimentos de um navio com prioridade na instalação de sistemas de ar condicionado (Mackwrth, 1946; Riniolo & Schmidt, 2006). Mackwrth (1946) investigou o efeito do calor e humidade sobre a habilidade de ouvir e registar mensagens em código morse com sucesso, tarefa que exige uma constante concertação.

Este estudo envolveu 11 voluntários entre os 18 e os 34 anos fisicamente saudáveis, tendo estes sido sujeitos a ambientes de *stress* térmico durante várias horas por dias ao longo de várias semanas. Os resultados obtidos revelaram que os ambientes de *stress* térmico foram responsáveis pela redução da concentração dos operadores e responsáveis por um aumento na média de erros no registo das mensagens, registando-se uma média de 94,7 erros por hora a uma temperatura de 36°C contra uma média de 11,5 erros obtidos num ambiente com uma temperatura de 31°C. Os resultados mostram que ambientes húmidos e quentes sugerem um impacto negativo na capacidade de concentração humana (Mackwrth, 1946).

Neste trabalho, estamos particularmente interessados em conhecer o padrão térmico de uma nave industrial, em detectar zonas vulneráveis a desconforto térmico e em sugerir estratégias de intervenção.

O ambiente em estudo é considerado de ambiente quente e esta situação pode condicionar o conforto do trabalhador e afectar índices de produção e de qualidade.

Esta dissertação é constituída por 7 capítulos: Introdução, Condições Higrométricas, Conforto Térmico, Metodologia, Resultados e Discussão, Considerações Finais e Perspectivas Futuras, Bibliografia e em dois Anexos estão indicados valores físicos aceites para valores de resistência de várias peças de roupa e valores de metabolismo para diferentes actividades.

No capítulo 1 (Introdução) é apresentada a problemática que levou ao desenrolar desta investigação, as questões orientadoras e os objectivos da pesquisa.

Conforto e desconforto térmico numa nave industrial – Estudo exploratório

Introdução

No capítulo 2 (Condições Higrométricas) é apresentada uma breve análise sobre algumas variáveis meteorológicas e termodinâmica do ar húmido.

No capítulo 3 (Conforto Térmico) é apresentada uma revisão bibliográfica sobre as principais normas internacionais (ISO, ASHRAE) sobre conforto / desconforto térmico assim como são introduzidos os índices *ITE*, *ITH*, *WBGT*, *EsConTer*, *PMV* e *PPD* e o diagrama de conforto / desconforto da Organização Mundial de Meteorologia, do inglês *World Meteorological Organization* (W.M.O.).

No capítulo 4 (Metodologia) é caracterizada a nave industrial onde o estudo teve lugar, é explicada a criação da matriz de postos de observação, indicando os parâmetros registados e instrumentos de medida utilizados. Neste capítulo são também expostos os métodos utilizados para o tratamento de dados.

No capítulo 5 (Resultados e Discussão) são aplicados os vários índices aos dados obtidos e feita a análise dos resultados.

No capítulo 6 (Considerações Finais e Perspectivas Futuras) são descritas algumas considerações inerentes aos resultados obtidos. São indicadas algumas limitações e apresentadas algumas estratégias para trabalho futuro.

2. Condições Higrométricas

2.1. ar húmido

O ar atmosférico pode ser admitido como sendo constituído por apenas dois gases, o ar seco e o vapor de água. Esta suposição ignora o facto de que o ar seco é constituído por uma mistura de vários gases considerados perfeitos. O ar seco é constituído maioritariamente por Nitrogénio (N_2), Oxigénio (O_2) e Árgon (Ar) e dióxido de carbono (CO_2) (McIntosh & Thon, 1981). O vapor de água, como o seu próprio nome indica, é constituído inteiramente por água no estado gasoso, e este constituinte da atmosfera é tratado individualmente pelas suas características únicas e pelo seu impacto na mesma. O vapor de água é o único constituinte da atmosfera que tem a capacidade de mudar de fase em diferentes condições atmosféricas, e este feito só por si não teria grande relevância se não fosse relevante na termorregulação da nossa atmosfera (McIntosh & Thon, 1981).

A mistura entre o ar seco e o vapor de água chama-se vulgarmente de ar húmido. O ar húmido tem uma grande relevância no conforto térmico devido à sua influência nos processos termorreguladores do corpo humano. A variação da pressão parcial de saturação de vapor de água à temperatura do ar condiciona a “performance” de um local. O vapor de água funciona como veículo de transferência de energia, que neste trabalho está relacionada com o suor presente na superfície exterior da pele do corpo humano. Por exemplo, quando o ar circundante regista uma humidade relativa alta, o processo de evaporação do suor (película fina de água que molha a pele) torna-se quase impossível, oferecendo ao ser humano uma sensação de desconforto. Nesta situação não há cedência de energia do corpo para o processo de evaporação e a temperatura interna do corpo continua a aumentar no tempo. Se por outro lado, o ar circundante regista uma humidade relativa não muito alta, o processo de evaporação é facilitado e a temperatura interna do corpo humano diminui pela cedência de energia para que a água evapore da superfície da pele. Neste caso, o ar húmido circundante funciona como um “mata-borrão ou esponja” e a pressão de saturação de vapor de água à temperatura do ponto de orvalho aumenta (Talaia, 2010). Devido a este facto podemos afirmar que as mudanças de estado que intervêm na caracterização de um ambiente térmico são estabelecidas entre o estado líquido e gasoso da água, como se ilustra na Figura 1 (McIntosh & Thon, 1981; Rodrigues, 2007; Tsonis, 2007).

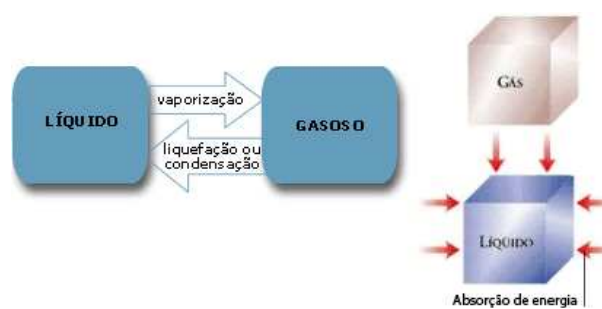


Figura 1— Mudança de estados e absorção de energia

A temperatura, a humidade relativa e a velocidade do ar são factores que condicionam o conforto térmico de um ser humano. Há uma relação entre a temperatura e a humidade relativa do ar, pelo que é de extrema importância quantificar a quantidade de vapor de água presente na atmosfera no local em estudo. A importância da quantidade de vapor de água existente na atmosfera influencia directamente o processo de sudoreação. Por exemplo, uma atmosfera saturada de vapor, como já referido, torna o processo de sudoreação ineficiente pois a evaporação do suor pode cessar por completo ou é gravemente reduzida provocando um aumento da temperatura interior corporal (Rodrigues, 2007).

Estas relações estão apresentadas e discutidas nas normas da International Standardisation Organisation (ISO) e American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) que servirão de base teórica à interpretação física do conforto / desconforto nos casos estudados nesta dissertação.

2.1.1. Equações de estado

A equação de estado de um gás perfeito é dada por:

$$pV = nRT \quad (1)$$

onde p (Pa) corresponde à pressão absoluta a que o gás está sujeito e n ao número de moles que ocupa um volume V (m^3) à uma temperatura de T (K) e R a constante dos gases perfeitos cujo valor é de $8,314 \text{ J.kmol}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Considerando m a massa do gás e M a sua massa molar e, sabendo-se por definição que $n = m/M$, a expressão (1) pode tomar a seguinte forma,

$$pV = \frac{m}{M}RT \quad (2)$$

Como a massa volúmica do gás ρ é definida pela relação $\rho = m/V$, a expressão (2) torna-se

$$p = \rho \frac{RT}{M} \quad (3)$$

A expressão (3) tem uma grande vantagem em termos de aplicação, visto ser independente da quantidade de gás considerado e, este facto possibilita relacionar a pressão, massa volúmica e temperatura para substâncias indiferenciadas. Como todos os gases seguem aproximadamente a mesma expressão de estado (dentro de certas condições) obtemos assim uma expressão generalista para todos os gases. O cociente R/M representa a constante particular para o gás que se está a considerar.

Para o ar seco podemos escrever a expressão (3) na forma,

$$p_a = \rho_a R_a T \quad (4)$$

em que o índice a representa “ar seco”, p_a a pressão parcial do ar seco, ρ_a a massa volúmica do ar seco e R_a a constante particular para o ar seco e que é obtida através da relação

$$R_a = \frac{R}{M_a} \Leftrightarrow R_a = 287,05 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1} \quad (5)$$

com

$$M_a = \frac{\sum m_i}{\sum M_i} \Leftrightarrow M_a = 28,964 \text{ kg.kmol}^{-1} \quad (6)$$

Por sua vez para o vapor de água a expressão (3) pode ser escrita por

$$p_v = \rho_v R_v T \Leftrightarrow e_w = \rho_w R_w T \quad (7)$$

onde o índice v ou w representa “vapor de água”, p_v a pressão parcial do vapor de água (ou e_w), ρ_v a massa volúmica de vapor de água (ou ρ_w) e R_v a constante particular para o vapor de água (ou R_w) e que é obtida através da relação

$$R_v = 461,51 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

com

$$M_v = 18,015 \text{ kg.kmol}^{-1}$$

O cociente entre a constante particular do ar seco e a constante particular do vapor de água permite obter o resultado,

$$\varepsilon = \frac{R_a}{R_v} \Leftrightarrow \varepsilon = 0,622 \quad (8)$$

que está presente em muitas das expressões usadas no tratamento das características do ar húmido.

2.1.2. Termodinâmica do ar húmido

O ar, como já foi anteriormente referido, trata-se de uma mistura de gases que podem ser considerados como perfeitos, por este motivo e para possibilitar uma análise termodinâmica do ar húmido temos que recorrer a lei de Dalton (Tsonis, 2007). Esta lei permite considerar vários gases ideais tendo como base a consideração que se um volume V ocupado por vários gases, por exemplo, com n_1 número de moles do gás 1, n_2 número de moles do gás 2 e assim sucessivamente para os restantes gases. A pressão total exercida nas paredes do recipiente é igual à soma de todas as colisões das moléculas (de todos os gases) nas paredes do recipiente (Tsonis, 2007). Através destas considerações é possível escrever a expressão (1) da seguinte forma,

$$p = \frac{(n_1+n_2+\dots+n_{n-1}+n_n)}{V} RT \quad (9)$$

ou

$$p = \frac{n_1RT}{V} + \frac{n_2RT}{V} + \dots + \frac{n_{n-1}RT}{V} + \frac{n_nRT}{V} \quad (10)$$

Com base na expressão (1) pode ser afirmado que cada termo do segundo membro da expressão (10) representa a pressão parcial que cada gás exerce sobre as paredes do recipiente. Verifica-se que a soma de todas as pressões parciais da totalidade dos gases é igual à pressão total exercida nas paredes do recipiente por todos os gases.

A lei de Dalton mostra que a pressão total é determinada a partir da soma de todas as pressões parciais de cada gás que constitui a amostra como se cada gás fosse o único ocupante do volume que a mistura ocupa à temperatura T . Assim sendo, virá

$$p = \sum_{i=1}^k p_i \quad (11)$$

Considerando que o volume ocupado pelo ar húmido é apenas ocupado pelo ar seco e pelo vapor de água, por aplicação da expressão (11) obtém-se

$$p = p_a + p_v \Leftrightarrow p = p_a + e_w \quad (12)$$

Em que o valor da pressão total do ar húmido (p) representa o valor da pressão atmosférica registado pelo barómetro e o valor da pressão do vapor de água (e_w) pode ser avaliado através de ábacos e/ou tabelas ou recorrendo a expressão de Clausius-Clapeyron (Rodrigues, 2007).

Partindo com base que a energia específica de Gibbs para as fases líquidas e gasosas é a mesma a partir da fronteira de fase, é possível calcular a inclinação do limite de fase no plano $T - p$. Esta inclinação representa o ritmo de variação da pressão de vapor com a temperatura enquanto o sistema se vai movendo através da sua fronteira de fase. Esta valoriza o ritmo a que a saturação da pressão de vapor aumenta quando a temperatura também aumenta (North & Erukhimova, 2009).

Uma mudança reversível do sistema composto por uma fase líquida e uma gasosa em equilíbrio ao longo da fronteira de fase é dada por

$$\Delta g_l(T, p) = \Delta g_g(T, p) \quad (13)$$

Usando a notação diferencial em vez da notação infinitesimal, tem-se

$$-s_l dT + v_l dp = -s_g dT + v_g dp \quad (14)$$

Na expressão (14) as variáveis s e v são referentes à entropia específica e ao volume específico, respectivamente. A pressão de saturação de vapor de água p para não ser confundida com a pressão atmosférica (pressão absoluta) é substituída pela simbologia e_s , em que o índice s representa saturação. Nestes termos, a expressão (14) pode ser reescrita,

$$\frac{de_s}{dT} = \frac{(s_g - s_l)}{(v_g - v_l)} \quad (15)$$

Conforto e desconforto térmico numa nave industrial – Estudo exploratório

Condições Higrométricas

Na atmosfera é aceite usar a aproximação de que $(v_g - v_1) \approx v_g$, uma vez que v_g é muito superior em face de v_l ou seja $v_g \gg v_l$. Nestes termos

$$v_g = \frac{(R_w T)}{e_s} \quad (16)$$

Mas é sabido que o calor de transformação ou variação da entalpia é dada por

$$\Delta H_v = L \Leftrightarrow L = \int_l^g T ds \quad (17)$$

e

$$L = T(s_g - s_l) \quad (18)$$

Combinando as expressões (15), (16) e (18), a partir de manipulações matemáticas obtém-se (North & Erukhimova, 2009),

$$\frac{de_s}{dT} = \frac{Le_s}{R_w T^2} \quad (19)$$

onde L representa a variação de entalpia específica de vaporização ou calor de transformação.

Para se obter uma expressão para $e_s(T)$ é necessário proceder à integração da expressão (19). Esta expressão pode ser escrita na forma,

$$d \ln e_s = \frac{L}{R} \frac{dT}{T^2} \quad (20)$$

O calor de transformação depende da temperatura, no entanto se a temperatura for assumida constante (é uma boa aproximação) é possível integrar a expressão (20) e o resultado será,

$$\ln \frac{e_s}{e_{s(0)}} = \frac{L}{R_w} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \quad (21)$$

que é conhecida como equação de Clausius-Clapeyron.

Considerando o ponto de referência experimental (North & Erukhimova, 2009) $T_0 = 273,15\text{K}$ e $e_s(0) = 6,11\text{ hPa}$, com os valores típicos aceites de $L \approx 2,5 \times 10^6\text{ J.kg}^{-1}$ e $R_w = 461,51\text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, obtém-se as seguintes expressões para determinar a pressão de saturação de vapor de água à uma determinada temperatura T (Rodrigues, 2007; Tsonis, 2007; North & Erukhimova, 2009),

$$\ln \frac{e_s}{6,11} = \frac{L}{R_w} \left(\frac{1}{273,15} - \frac{1}{T} \right) \quad (22)$$

ou

$$e_s(T) = 6,11e^{\left(19,83 - \frac{5417}{T}\right)} \quad (23)$$

A partir da expressão (23) pode-se concluir que a pressão de saturação de vapor apenas depende da temperatura (Rodrigues, 2007; Tsonis, 2007; North & Erukhimova, 2009).

2.1.3. Humidade relativa do ar

A humidade relativa (U) mede a quantidade de vapor de água na atmosfera quando se conhece a temperatura do ponto de orvalho. A humidade relativa é determinada pelo cociente entre a razão de mistura actual (à temperatura do ponto de orvalho) e a razão de mistura de saturação (à temperatura do ar), ambas a uma dada pressão ou mesmo nível isobárico. Ou seja, mede a relação entre a pressão de saturação de vapor de água à temperatura do ponto de orvalho e a pressão de saturação de vapor de água à temperatura do ar.

Para a determinação da humidade relativa é necessário conhecer o valor de algumas grandezas higrométricas (Rodrigues, 2007), que a seguir serão descritas.

2.1.3.1. Razão de Mistura

A razão de mistura é o cociente entre a massa volúmica de vapor de água e a massa volúmica de ar seco a uma dada pressão atmosférica p . O valor da razão de mistura é expresso em grama de vapor de água por quilograma de ar seco. Assim sendo,

$$r = \frac{\rho_v}{\rho_a} \quad (24)$$

Recorrendo as expressões (4), (7), (8) e (12) podemos reescrever a expressão (24) na forma,

$$r = 0,622 \frac{e}{(p-e)} \quad (25)$$

Tendo em atenção que na atmosfera o valor de $p \gg e$, o valor da pressão de vapor e pode ser desprezado em face de p , vindo

$$r \simeq 0,622 \frac{e}{p} \quad (26)$$

A expressão (26) é uma excelente aproximação do valor da razão de mistura quando são conhecidas a pressão parcial de vapor de água à temperatura do ponto de orvalho e a pressão parcial de saturação de vapor de água à temperatura do ar.

2.1.3.2. Razão de mistura de saturação

A razão de mistura de saturação não passa de um caso particular da razão de mistura ou razão de mistura actual determinada pela expressão (25). É uma medida de saturação em que a pressão parcial de vapor de saturação à temperatura do ponto de orvalho é substituída pela pressão parcial de vapor de saturação à temperatura do ar.

Nestes termos as expressões (25) e (26) são escritas na forma,

$$r = 0,622 \frac{e_s}{(p - e_s)} \quad (27)$$

e

$$r \simeq 0,622 \frac{e_s}{p} \quad (28)$$

2.1.3.3. Temperatura do ponto de orvalho

A temperatura do ponto de orvalho (T_d) é a temperatura para a qual uma dada parcela de ar húmido necessita ser arrefecida (a pressão constante) de forma ao vapor de água contido na parcela condensar.

A temperatura do ponto de orvalho está associada à humidade relativa. Para valores altos de humidade relativa a temperatura do ponto de orvalho encontra-se próxima da temperatura do ar. Para valores de humidade relativa de 100% a temperatura do ponto de orvalho iguala a temperatura do ar e o ar está saturado. Se a temperatura do ponto de orvalho permanecer constante e se a temperatura do ar aumentar, a humidade relativa do ar irá diminuir, ou seja esta diminuição acontece devido ao aumento da pressão parcial de saturação à temperatura do ar.

Nestes termos quando a parcela de ar atingir uma temperatura igual à temperatura do ponto de orvalho, a razão de mistura actual r torna-se igual à razão de mistura de saturação r_s , dado ser

$$e_s(T_d) = e_s(T) \quad (29)$$

2.1.3.4. Humidade relativa do ar

A humidade relativa do ar é dada através do quociente entre a razão de mistura (r) e a razão de mistura de saturação (r_s),

$$U = \frac{r}{r_s} \times 100 \quad (30)$$

Recorrendo às expressões (26) e (28), a expressão (30) pode ser reescrita de forma mais simples e só em função de pressões parciais de vapor de água,

$$U \simeq \frac{e(T_d)}{e(T)} \times 100 \quad (31)$$

A humidade relativa do ar aumenta com a diminuição da temperatura do ar (T), pois a pressão parcial de vapor $e(T)$ também diminui. Equivale a afirmar que a pressão parcial de vapor saturada à temperatura do ar se aproxima da pressão parcial $e_s(T_d)$ à temperatura do ponto de orvalho. Estes acontecimentos podem ser interpretados através da expressão (31).

A expressão (30) pode apresentar o aspecto,

$$U = \frac{r(T_d, p)}{r_s(T, p)} \times 100 \quad (32)$$

em que mostra que a razão de mistura actual está relacionada com a temperatura do ponto de orvalho e um nível isobárico e a razão de mistura de saturação está relacionada com a temperatura do ar e o mesmo nível isobárico ou mesma pressão.

Quando se usa um psicrómetro onde é registada a temperatura do ar e a temperatura do termómetro molhado, é possível determinar a humidade relativa do ar recorrendo, por exemplo, à fórmula de Sprung,

$$U = \frac{100}{e(T)} \left[e(T_w) - 0,79 \frac{p}{760} (T - T_w) \right] \quad (33)$$

2.1.3.5. Temperatura de globo

A temperatura de globo (T_g) depende da temperatura média radiante, da temperatura do ar e da velocidade do ar. Para medir a temperatura de globo é necessário um termómetro de globo constituído por uma esfera de cobre, oca pintada externamente de negro. Esta esfera tem como objectivo simular o comportamento de um corpo negro e absorver toda a radiação infravermelha nela incidente. Geralmente para atingir este efeito usa-se uma esfera de 15cm de diâmetro com um índice de emissividade de 0,95 (ISO 7243, 1989).

2.1.3.6. Temperatura média radiante

A transferência de energia sob a forma de calor por radiação num ambiente é um factor de desconforto térmico a ser valorizado, segundo a norma ISO 7726 (1998).

A temperatura média radiante (T_{RM}) depende da temperatura ambiente (T), da temperatura de globo (T_g) e da velocidade do ar (v_{ar}) e é expressa em K ou °C e é determinada através da expressão (ISO 7243, 1989),

$$T_{RM} = \sqrt[4]{(T + 273)^4 + 2,5 \times 10^8 (T_g - T) \sqrt{v_{ar}}} - 273 \quad (34)$$

2.1.3.7. Termómetro molhado natural

Esta variável meteorológica (T_{wn}) depende da temperatura, velocidade e humidade relativa do ar bem como da temperatura media radiante.

A temperatura natural do termómetro molhado (T_{wn}) difere da temperatura do termómetro molhado (T_w), pois enquanto que o primeiro é utilizado para avaliar a humidade relativa usando instrumentos de medida como o psicrómetro giratório, o segundo utiliza um termómetro de bolbo envolvido numa gaze ou musselina que está em contacto com um corpo de água destilada.

2.1.3.8. Temperatura operativa

A temperatura operativa relaciona a actividade de um ser humano com o vestuário. Por exemplo, se a actividade for considerada a mesma, de valor constante, será o vestuário a variável que condiciona a temperatura operativa. Para um valor de clo (medida de vestuário) mais alto a temperatura operativa é mais baixa. Na prática o vestuário condiciona as perdas de energia sob a forma de calor para o ambiente circundante.

No estudo do conforto térmico humano, a temperatura operativa é um parâmetro que mede o efeito de arrefecimento do ar que envolve um corpo humano. A temperatura operativa pode ser definida como a média das temperaturas médias radiantes e do ambiente, ponderadas pelos respectivos coeficientes de transferência de calor.

2.1.3.9. Velocidade do ar

A velocidade do ar v intervém directamente nas trocas de energia sob a forma de calor por convecção e evaporação. Por ser uma variável meteorológica com um ritmo de mutabilidade muito elevada contabiliza-se geralmente em intervalos como os que estão indicados na Tabela 1 a fim de ser considerados no tratamento de dados.

Tabela 1 — Sensibilidade do movimento do ar (Rodrigues, 2007)

| <i>Situação</i> | <i>Velocidade do ar (v) m.s⁻¹</i> |
|---------------------------|--|
| Ausência de movimento | < 0,30 |
| Ligeira brisa | 0,30 – 0,50 |
| Causa movimento do cabelo | 0,50 – 1,50 |
| Sensação forte | > 1,50 |

2.1.4. Calor e Temperatura

As definições de calor e temperatura são usualmente confundidas, no entanto existe uma clara diferença entre as duas.

A temperatura é uma medida da quantidade de energia possuída pelas moléculas de uma substância. Esta é uma medida relativa de quão quente ou quão frio uma substância se encontra e pode ser utilizada para prever a direcção da transferência de energia sob a forma de calor. A temperatura é usualmente representada por T .

O calor é por sua vez energia em trânsito. Isto é, a transferência de energia em forma de calor ocorre ao nível molecular como resultante de uma diferença de temperatura. O calor pode ser transferido através de sólidos por condução, através de líquidos por condução e convecção e no vácuo sobre a forma de radiação. O calor é representado por Q (U. S. Department of Energy, 1992).

3. Conforto Térmico

3.1. Introdução

O conforto térmico é definido como o sentimento de satisfação perante um ambiente térmico onde o indivíduo se encontra.

A insatisfação com o ambiente térmico pode dar-se quando um indivíduo se encontra num ambiente frio ou ambiente quente e que esse ambiente crie uma sensação de desconforto em todo o corpo. No entanto o desconforto térmico também se pode manifestar por um indivíduo ter uma sensação de calor ou de frio indesejado numa determinada parte do corpo estando em desconforto térmico local (Butera, 1998).

Por o conforto térmico se tratar de uma sensação e não de um parâmetro físico ou matemático possível de quantificar com exactidão, torna a definição de conforto térmico muito subjectiva dependendo de indivíduo para indivíduo. Esta definição pode até mesmo variar no mesmo indivíduo consoante o seu estado de saúde e/ou estado psicológico. Nestas circunstâncias um ambiente térmico neutro universal é impossível de obter para todos os indivíduos. Um dos objectivos deste trabalho é determinar as características de um ambiente térmico e conhecer zonas de desconforto que necessitem de uma adopção de critérios de intervenção, para um local.

3.2. Índices de conforto térmico / *stress* térmico

Na literatura da especialidade é apresentada um número elevado de índices térmicos que permitem caracterizar um ambiente térmico.

Nesta investigação estamos particularmente interessados na aplicação dos índices *WBGT*, *EsConTer*, índice *PMV* e *PPD*. Contudo serão também considerados, por serem de fácil aplicação, os índices *ITE* e *ITH* como método de comparação.

A seguir descrevem-se os diferentes índices e apresentam-se as expressões para a sua determinação.

3.2.1. Índice *ITE*

O Índice de Temperatura Efectiva *ITE* é usualmente aplicado para conhecer a sensação térmica interior de um local e do exterior do mesmo.

A temperatura efectiva é um dos índices de *stress* térmico com uma maior área de aplicação. O Índice de Temperatura Efectiva *ITE* permite relacionar os efeitos da temperatura do ar T e da humidade relativa U no bem-estar do ser humano. Assim, dois ambientes com a mesma temperatura efectiva devem admitir a mesma resposta térmica, mesmo com valores diferentes de temperatura do ar e de humidade relativa do ar desde que se registe o mesmo valor da velocidade do ar (Houghten & Yaglou, 1923; ASHRAE, 2001).

O índice *ITE* resultou de um estudo empírico realizado em câmaras climatizadas em que diferentes indivíduos foram questionados sobre o seu bem-estar quando sujeitos a distintas condições ambientais. Foram utilizadas duas câmaras de teste climatizadas ligadas por uma porta, que estavam sujeitas a diferentes valores de temperatura e humidade relativa do ar. Numa das câmaras, foram mantidos os registos da temperatura do ar e humidade relativa (100%) enquanto

que na outra câmara a temperatura do ar e a temperatura do termómetro húmido eram alteradas. Através da porta de ligação os indivíduos circulariam de uma câmara para a outra relatando aos investigadores a sua sensação térmica por comparação das sensações térmicas vivenciadas nas duas câmaras.

Com esta metodologia, quando se variava os valores da temperatura e da temperatura húmida, ou seja, quando se variava a humidade relativa do ar, determinaram-se linhas que correspondiam a uma sensação térmica de bem-estar através das respostas “imediatas” dos indivíduos.

Na prática, o Índice *ITE* pode ser avaliado de duas formas, ou através de ábacos / cartas psicrométricas ou analiticamente.

Analiticamente o índice *ITE* (Thom, 1959) pode ser determinado recorrendo à expressão,

$$ITE = 0,4(T_{wn} + T) + 4,8 \quad (35)$$

em que T_{wn} representa a temperatura húmida (°C) e T a temperatura do ar (°C). Na expressão (35) o índice *ITE* é expresso em °C.

Na Tabela 2 estão indicados valores limites usados e aceites para o índice *ITE*.

Tabela 2— Valores limites para o Índice *ITE* (Mikani & Amorim, 2005)

| <i>ITE</i> | <i>Sensação Térmica</i> |
|---|---|
| $ITE \leq 18,9^{\circ}\text{C}$ | <i>stress</i> provocado por ambiente frio |
| $18,9^{\circ}\text{C} < ITE < 25,6^{\circ}\text{C}$ | zona de conforto térmico |
| $25,6^{\circ}\text{C} < ITE$ | <i>stress</i> provocado por ambiente quente |

3.2.2. Índice *ITH*

Um índice que se torna de fácil aplicação é o índice *ITH*, Temperature Humidity Index. Foi inicialmente desenvolvido por Thom (1959) e combinava a temperatura do termómetro molhado T_{wm} (°C) com a temperatura do ar T (°C).

Nieuwolt (1977) modificou o índice *ITH* estabelecido por Thom (1959) usando a temperatura do ar T (°C) e a humidade relativa U (%). Esta alteração teve como objectivo facilitar a sua aplicação e avaliação visto que os valores da humidade relativa do ar U estão mais frequentemente disponíveis que os valores da temperatura do termómetro de bolbo molhado.

O índice *ITH* é calculado a partir da expressão Nieuwolt (1977),

$$ITH = 0,8T + T \frac{U}{500} \quad (36)$$

em que T representa a temperatura do ar (°C) e U a humidade relativa do ar (%).

Através de testes empíricos, Nieuwolt (1977) estabeleceu valores de referência que delimitam situações de conforto e *stress* térmico para seres humanos.

Na Tabela 3 encontram-se valores limites usados e aceites para o índice *ITH*.

Conforto e desconforto térmico numa nave industrial – Estudo exploratório

Conforto Térmico

Tabela 3 — Valores limites para o índice *ITH* [adaptado de Emmanuel (2004)]

| <i>ITH</i> | |
|---|--|
| $21^{\circ} \text{C} \leq ITH \leq 24^{\circ} \text{C}$ | 100% dos indivíduos estão termicamente confortáveis |
| $24^{\circ} \text{C} < ITH \leq 26^{\circ} \text{C}$ | 50% dos indivíduos estão termicamente confortáveis |
| $ITH > 26^{\circ} \text{C}$ | 100% dos indivíduos estão termicamente desconfortáveis |

3.2.3. Índice *WBGT*

O índice *WBGT*, Índice de Temperatura de Bolbo Húmido e de Temperatura de Globo (tradução do inglês Wet Bulb Globe Temperature Index), é um índice de avaliação de conforto térmico dos mais utilizados no Mundo. De acordo com Yaglou & Minard (1957), o índice *WBGT* foi desenvolvido pela Marinha dos Estados Unidos da América após uma investigação sobre acidentes por calor sofridos pelo pessoal militar. Funcionava como uma aproximação à Temperatura Efectiva Corrigida, mais complicada de determinar, modificada para ter em conta a absorção solar dos uniformes militares. Os valores limites de *WBGT* determinavam a ocorrência de treinos militares. Observou-se que os acidentes e o tempo perdido em interrupções à instrução militar se reduziram significativamente quando se utilizava o índice *WBGT* ao invés da temperatura do ar.

A norma que regulariza a determinação do índice *WBGT* é a ISO 7243 (1989) que define o nível de desconforto do ambiente em situações onde por razões técnico-económicas se torna impossível aplicar a norma ISO 7730 (2005). O índice *WBGT* é determinado através das seguintes expressões que são fornecidas pela norma ISO 7243 (1989).

Ambiente externo com radiação solar directa:

$$WBGT = 0,7T_{wn} + 0,2T_g + 0,1T \quad (37)$$

Ambiente interior ou exterior sem radiação solar directa:

$$WBGT = 0,7T_{wn} + 0,3T_g \quad (38)$$

onde T_{wn} representa a temperatura do bolbo húmido com ventilação natural ($^{\circ}\text{C}$) e T_g a temperatura do globo ($^{\circ}\text{C}$).

Em casos de ambientes heterogéneos, onde os parâmetros do espaço em redor do indivíduo não são constantes, o índice *WBGT* deverá ser calculado em três posições diferentes, representando o $WBGT_C$ o nível da cabeça, $WBGT_A$ o nível do abdómen e $WBGT_T$ o nível do tornozelos da pessoa relativamente ao nível do solo.

Uma vez conhecido o valor do índice *WBGT* é possível, mediante comparação com valores de referência, determinar o nível de "stress" térmico a que o trabalhador está sujeito e, caso se justifique, limitar o seu tempo de exposição às condições térmicas que originam o "stress" térmico medido.

Na Tabela 4 estão indicados valores limites usados e aceites para o índice *WBGT*.

Tabela 4 — Valores referência de *WBGT* [adaptado de Corleto (1998) e Martinet & Meyer (1999)]

| Taxa metabólica <i>M</i> ($W \cdot m^{-2}$) | Valor de referência de <i>WBGT</i> | | |
|--|--|--|---------------------------------|
| | Trabalhador aclimatizado | | Trabalhador não aclimatizado |
| | $v \leq 1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ | $v \geq 1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ | |
| Trabalho manual leve $65 < M \leq 130$ | 30,0 | 32,5 | 29,0 |
| Trabalho braçal moderado $130 < M < 200$ | 27,8 | 30,5 | 25,7 |

3.2.4. Índice *EsConTer*

O índice *EsConTer* é baseado numa escala de cores (*Es*), por considerar a sensação de conforto (*Con*) e por ser térmica (*Ter*) e valoriza o conhecimento da temperatura do ar e temperatura do termómetro molhado (Talaia & Simões, 2009) e é calculado aplicando a expressão,

$$EsConTer = -3,75 + 0,103(T + T_w) \quad (39)$$

onde *T* representa a temperatura do ar registada no termómetro seco (°C) e *T_w* a temperatura molhada ou temperatura registada no termómetro molhado (°C).

O índice *EsConTer* permite na gama de valores -3 a +3 indicar a sensação térmica de um ambiente muito frio a um ambiente muito quente.

Numa escala de cores, como se mostra na Figura 2, o indivíduo deve marcar uma “cruz” da sensação térmica que está a sentir no momento da observação.

A grande vantagem deste índice é a facilidade de leitura e interpretação pela escala usada de -3 a +3 e o baixo custo associado ao instrumento de medida, um psicrómetro.

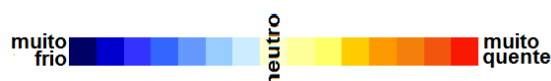


Figura 2 — Escala térmica de cores – sensação térmica real.

3.2.5. Índices *PMV* e *PPD*

O índice *PMV*, Voto Médio Estimado (tradução do inglês *Predicted Mean Vote*), foi desenvolvido em 1970 através de experiências laboratoriais em divisões climatizadas (Franger, 1972). Em determinadas experiências o ambiente térmico era controlado pelo investigador e os indivíduos mostravam a sua satisfação ou insatisfação com o ambiente usando a escala sétima da *ASHRAE*, como se mostra na Figura 3 (*ASHRAE*, 2004; Charles, 2003).

Noutras experiências o ambiente era ajustado pelos indivíduos correspondendo este ao valor “0” da escala de *ASHRAE*, ou seja um ambiente termicamente neutro (Mikani & Amorim, 2005).



Figura 3— Escala Sétima da ASHRAE

O índice *PMV* prevê o voto médio estimado de um grande grupo de pessoas sujeitas a um mesmo ambiente térmico e, baseia-se na expressão de balanço térmico e nas teorias de termorregulação. A definição do índice *PMV* foi possível conjugando estatisticamente a resposta fisiológica do sistema de termorregulação com os votos de 1300 sujeitos segundo a escala sétima da ASHRAE.

A aplicação do índice *PMV* é recomendada apenas quando as variáveis meteorológicas e pessoais estão dentro de certos intervalos (Lamberts, 2002).

A Tabela 5 indica os valores limites para a aplicação do índice *PMV*. Os parâmetros indicados na Tabela 5 são de dois tipos: valores estimados (taxa metabólica, *M*, resistência térmica do vestuário, *I_{CL}*, e variáveis meteorológicas temperatura do ar, *T*; temperatura radiante média, *T_{RM}*, velocidade do ar, *v*; pressão parcial de vapor de água, *e(T_d)*,

Tabela 5— Valores limites para aplicação do índice *PMV*

| | | |
|---------------------|--------------|---------------------|
| 0,8 met | $< M <$ | 4 met |
| 0 clo | $< I_{CL} <$ | 2 clo |
| 10° C | $< T <$ | 30° C |
| 10° C | $< T_{RM} <$ | 40° C |
| 0 m.s ⁻¹ | $< v <$ | 1 m.s ⁻¹ |
| 0 Pa | $< e(T_d) <$ | 2700 Pa |

O índice de *stress* térmico *PMV* é calculado a partir de uma expressão geral de balanço energético (Lamberts, 2002) que é função de várias termos intermédios, nomeadamente

$$+(M - W) \tag{40}$$

que representa o metabolismo e trabalho,

$$-3,05 \times 10^{-3} [5733 - 6,99(M - W) - e(T_d)] \tag{41}$$

a difusão de vapor, ou seja, um termo relacionado com a evaporação,

$$-0,42[(M - W) - 58,15] \tag{41}$$

a transpiração, ou seja, um termo relacionado com a evaporação,

$$-1,7 \times 10^{-5} M [5867 - e(T_d)] \quad (43)$$

a respiração latente, ou seja, um termo relacionado com a respiração,

$$-0,0014 M (34 - T) \quad (44)$$

a respiração sensível, ou seja, um termo relacionado com a respiração,

$$-3,96 \times 10^{-8} f_{CL} [(T_{CL} + 273)^4 - (T_{MR} + 273)^4] \quad (45)$$

a radiação, ou seja, a perda de energia sob a forma de calor por radiação (lei de Stefan-Boltzmann),

$$+ f_{CL} h_c (T_{CL} - T) \quad (46)$$

a convecção, ou seja, a perda de energia sob a forma de calor por convecção.

No balanço energético deverá, também, aparecer um termo que representa a acumulação de calor.

A constante indicada na expressão (45) de $3,96 \times 10^{-8}$ é determinada tendo por base a expressão

$$\varepsilon \sigma \left(\frac{A_{ef}}{A_{DU}} \right) \quad (47)$$

em que ε indica a emissividade (assume-se um valor de 0,97), σ a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8}$) $W.m^{-2}.K^{-4}$, A_{ef} a área efectiva do corpo para haver transferência de energia sob a forma de calor por radiação e A_{DU} a área corporal, ou seja, a área da superfície exterior de uma pessoa nua (de notar que $A_{ef} < A_{DU}$).

A avaliação da área da superfície extensível do corpo nu (Dubois & Dubois, 1916) é feita a partir da expressão,

$$A_{DU} = 0,203 m^{0,425} Z^{0,725} \quad (48)$$

onde m representa a massa (kg) e Z a altura (m) da pessoa. Para um adulto, o valor típico aceite para a superfície corporal é de $1,7 m^2$.

Neste trabalho assumiu-se que $(A_{ef}/A_{DU}) \approx 0,71$

A temperatura exterior do vestuário T_{CL} é determinada por:

$$T_{CL} = T_{pele} - C \quad (49)$$

em que na expressão (46),

$$T_{pele} = 35,7 - 0,028(M - W) \quad (50)$$

e

$$C = -I_{CL}[3,96 \times 10^{-8}f_{CL}[(T_{CL} + 273)^4 - (T_{MR} + 273)^4] + f_{CL}h_c(T_{CL} - T)] \quad (51)$$

O factor de vestuário I_{CL} depende da área exterior do vestuário e da área corporal. O factor de vestuário correlaciona-se com a resistência térmica do vestuário, é a dimensional e superior à unidade.

Nas expressões (46) e (51), h_c representa o coeficiente de transferência de energia sob a forma de calor por convecção.

Segundo a norma ISO 7730, o índice de *stress* térmico *PPD* é determinado a partir do conhecimento do índice *PMV* (ISO 7730, 2005).

O índice *PPD*, Percentagem de Pessoas Insatisfeitas (tradução do inglês *Predicted Percentage of Dissatisfied Vote*), estabelece a percentagem de pessoas insatisfeitas termicamente com o ambiente e, é determinado a partir do conhecimento do índice *PMV* (ISO 7730, 2005). Este baseia-se na percentagem de um grande grupo de pessoas que gostariam que o ambiente estivesse mais quente ou mais frio, votando +3, +2 ou -3 e -2, na escala sétima de ASHRAE.

O índice *PPD* é determinado analiticamente através da expressão,

$$PPD = 100 - 95e^{-(3,353 \times 10^{-2}PMV^4 + 2,179 \times 10^{-1}PMV^2)} \quad (52)$$

É impossível obter num ambiente uma combinação das variáveis meteorológicas e pessoais que satisfaça plenamente a todos os indivíduos de um grande grupo; o valor do índice *PPD* nunca é inferior a 5%. O valor mínimo de *PPD* corresponde à condição de neutralidade térmica; a curva é simétrica em relação ao ponto de $PMV = 0$, ou seja, observam-se sensações equivalentes de calor e de frio para um mesmo *PMV* em valor absoluto, correspondendo a uma percentagem igual de insatisfeitos.

Estas conclusões resultam da diferença de sensação térmica entre diferentes indivíduos. A neutralidade térmica é atingida com diferentes valores de temperatura do ar, humidade relativa e velocidade do ar, consoante o indivíduo e a sua capacidade de aclimatização.

Os valores máximos admissíveis para os índices *PMV* e *PPD*, para que se possa considerar a área estudada uma zona de conforto são respectivamente:

$$\left\{ \begin{array}{l} -0,5 < PMV < +0,5 \\ PPD < 10\% \end{array} \right. \quad (53)$$

3.2.6. Diagrama de conforto / desconforto da Organização Mundial de Meteorologia

Por considerarmos de fácil aplicação e por indicar estratégias de intervenção foi aplicado aos dados registados, para o interior do local, o diagrama de duas entradas (temperatura do ar e humidade relativa do ar) da World Meteorological Organization (W.M.O., 1987).

A Figura 4 mostra o diagrama da WMO e a observação da figura indica que são necessárias apenas duas entradas, a temperatura do ar e a humidade relativa do ar, para se conhecer a sensação térmica. Uma grande vantagem deste diagrama, em relação aos índices anteriormente referidos, é indicar estratégias de intervenção para melhorar as condições ambientais.

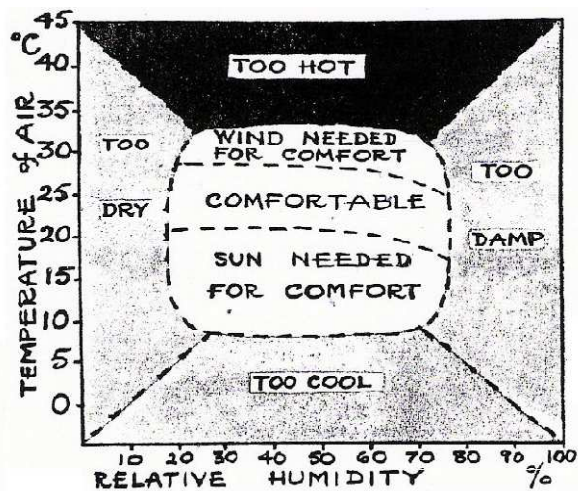


Figura 4 — Diagrama de conforto/desconforto (W.M.O., 1987).

4. Metodologia

4.1. Introdução

Para a realização do estudo apresentado nesta dissertação foi necessário desenhar diferentes etapas.

Inicialmente suscitou-se o interesse da Direcção de Higiene e Segurança (D.H.S.) da empresa.

Foram discutidas as etapas para o registo de dados.

A empresa foi visitada e foi seleccionada a nave de intervenção. A nave foi analisada em termos de implantação de equipamento e foi decidido criar 71 postos de observação.

Dada a localização de portas de acesso, avaliou-se o melhor “caminho” para o registo de dados. Esta optimização foi feita através de recolha de dados.

Foram inicialmente registados diferentes parâmetros, nomeadamente a temperatura do ar, a humidade relativa do ar, a velocidade do ar e a pressão atmosférica.

Depois de avaliar a variação dos parâmetros velocidade do ar, sempre inferiores a $0,2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ e a variação da pressão atmosférica, decidiu-se apenas considerar em termos de informação a temperatura do ar e da humidade relativa do ar.

Construíram-se algoritmos para tratar os dados registados.

Foram criados mapas de padrão térmico e de humidade relativa do ar assim como de sensação térmica por aplicação de diferentes índices.

Foram detectadas zonas vulneráveis e foram discutidas estratégias de intervenção.

Uma alternativa ao estudo local de uma zona vulnerável da unidade fabril acerca do conforto / desconforto de postos de trabalho foi considerada e um estudo complementar de valores publicados foi considerado.

Neste estudo, foram consideradas variáveis pessoais, a saber, a taxa metabólica e a resistência térmica do vestuário, para a aplicação de um balanço energético.

Usaram-se diferentes índices para compreender a correlação entre eles e a concordância de análise de resultados.

Um diagrama da Organização Mundial de Meteorologia foi também usado.

Estratégias de intervenção foram consideradas e as considerações finais mostram a importância dos resultados obtidos.

4.2. Caracterização da nave industrial

A nave é de uma empresa do ramo da metalomecânica, com cerca de 7500 m^2 , localizada na região de Aveiro. A nave tem implantado equipamento diverso que está numa linha de montagem de produtos e é considerada de ambiente relativamente quente. Alguns fornos de tratamento térmico de peças, localizados na linha de produção, condicionam desconforto para os operários.

De modo a criar um ambiente mais confortável na linha de produção na nave, a empresa tem instalado um sistema de climatização. O desafio desta investigação passou também por validar o sistema de climatização instalado pela D.H.S.

4.3. Matriz de postos de observação

A matriz de postos de observação foi feita a partir do levantamento da implantação do equipamento na nave e considerando os corredores de passagem para o registo de dados. Uma estratégia usada para conhecer os postos de observação foi usar as colunas que suportam o telhado da nave como referência.

Para valorizar a influência de fontes de calor, portas ou janelas consideraram-se postos de observação nessas zonas.

Um total de 71 postos de observação foi desenhado na planta da nave para serem registados os parâmetros que condicionam o conforto / desconforto dos operários.

Dois postos de observação exteriores à nave foram também considerados para aplicar ao modelo, que foi desenvolvido, como condições fronteiras. Um destes postos de observação foi localizado num ambiente com telhado de vidro (Zona Oeste) e sem acesso directo ao exterior da nave, o outro foi localizado sob uma cobertura em betão com acesso directo à atmosfera (Zona Este).

4.4. Parâmetros registados

Nos postos de observação foram realizadas medições de temperatura do termómetro seco, de temperatura do termómetro molhado, de humidade relativa, de velocidade do ar e da pressão atmosférica.

Após ser avaliada numa primeira aproximação os padrões de cada parâmetro, decidiu-se registar apenas a temperatura do ar e humidade relativa do ar.

4.4.1. Instrumentos de medida usados

Nos registos efectuados, numa primeira fase, usaram-se dois tipos de instrumentos. Esta estratégia serviu apenas para validar as leituras e investigar se havia uma concordância com os valores registados.

O instrumento de medida Testo 435, dos serviços de controlo da empresa, foi usado na maioria dos registos de dados. Foi usada uma sonda para registar a temperatura, a humidade relativa, a pressão e a velocidade do ar.

O instrumento de medida Center 310, da Universidade, foi usado algumas vezes para comparar algumas “corridas” (chamamos de “corrida”, o registo de dados usando o mesmo instrumento). Foi usado um sensor de temperatura e humidade relativa do ar.

Os dois instrumentos de medida foram comparados em termos de tempo de resposta de registo, dado que esta condicionante é muito importante para a definição de padrões no interior da nave.

Um terceiro instrumento de medida Center 317, da Universidade, foi usado por fazer leituras da temperatura, humidade relativa, temperatura do ponto de orvalho e temperatura do termómetro molhado. Neste havia a vantagem de se conhecer dois parâmetros muito importantes que determinam conforto / desconforto humano, a temperatura do ponto de orvalho e a temperatura do termómetro molhado.

4.4.2. Construção de algoritmo “A”

A necessidade de se conhecer os padrões do interior da nave e ter uma escala homogénea de cor nos gráficos, levou ao desenvolvimento e adaptação de um algoritmo em MATLAB.

O algoritmo permite traçar mapas térmicos, de humidade relativa e mapas a partir da aplicação dos índices usados.

A normalização das cores dos mapas tem a vantagem de possibilitar e facilitar uma leitura, uma comparação e uma interpretação rápida dos mapas traçados.

O algoritmo “A” necessita de uma base de dados para correr e esta base foi organizada em ficheiro Excel, da seguinte maneira:

- Coluna 1 - valores da coordenada x (m)
- Coluna 2 - valores da coordenada y (m)
- Coluna 3 - valores da temperatura registada no interior da nave ($^{\circ}\text{C}$)
- Coluna 4 - valores da humidade relativa registada no interior da nave (%)

A fronteira dos mapas foi avaliada tendo em consideração a temperatura e humidade relativa registadas no exterior da nave.

O algoritmo “A” foi construído de maneira a ler o ficheiro Excel e extrair os dados contidos neste ficheiro e criar uma matriz com os mesmos de forma a poderem ser manipulados e de forma a calcular os vários índices necessários e gerar os mapas pretendidos.

O algoritmo “A” divide a matriz inicialmente obtida em duas matrizes distintas. Uma contendo as coordenadas do interior da nave e outra contendo a temperatura e a humidade relativa para cada ponto correspondente da primeira matriz.

Os valores de x e y que formam a primeira matriz foram ajustados recorrendo a uma função do programa MATLAB que ajusta vectores espaciais (x, y) que normalmente não formam uma superfície uniforme na forma $z = f(x, y)$. Esta função interpola esta superfície nos pontos especificados pelo (x_i, y_i) para produzir z_i . A superfície gerada através desta função passa sempre pelos pontos dados x_i e y_i e formam uma grelha uniforme.

Através deste processo torna-se possível interpolar os dados de forma a criar os mapas térmicos, de humidade relativa e de conforto / desconforto.

Para o cálculo dos índices foi criada uma função (*CalcErro.m*) que permite determinar a temperatura do termómetro molhado a partir do registo da temperatura do ar e da humidade relativa do ar. São usadas as expressões (23) e (33).

A partir de manipulações matemáticas a expressão (33) toma o aspecto,

$$\frac{[U \times e(T)]}{100} = [e(T_w) - 0,79(T - T_w)] \quad (54)$$

A expressão (54) pode ser vista como uma igualdade de duas funções, como se descreve,

$$f_1 = \frac{[U \times e(T)]}{100} \quad (55)$$

$$f_2 = [e(T_w) - 0,79(T - T_w)] \quad (56)$$

O algoritmo faz a convergência das duas funções e avalia o erro ou incerteza

$$|erro| = |f_1 - f_2| \Leftrightarrow |erro| \leq 1 \times 10^{-2} \quad (56)$$

O algoritmo utiliza o intervalo de valores definido pela expressão (56) para calcular os valores necessários à criação de gráficos, e enquanto os valores não se encontrarem dentro da condição da expressão o programa volta ao início até encontrar um valor que pertença ao intervalo definido.

Os dados obtidos servem para a aplicação de diferentes índices, que necessitam da temperatura do termómetro molhado.

O algoritmo após a criação dos diferentes gráficos também cria um novo ficheiro em formato Excel. Agora guarda todos os dados utilizados e calculados durante a operação do algoritmo, nesse mesmo ficheiro, para uma possível utilização futura sem ter que voltar a “correr” de novo o algoritmo.

Uma vantagem que o algoritmo tem é permitir uniformizar as cores dos mapas criados de modo a facilitar uma interpretação mais cuidada e rápida.

A título de exemplo, mostra-se na Figura 5 uma imagem que é observada no monitor do computador, numa fase em que mostra diferentes gráficos com padrões.

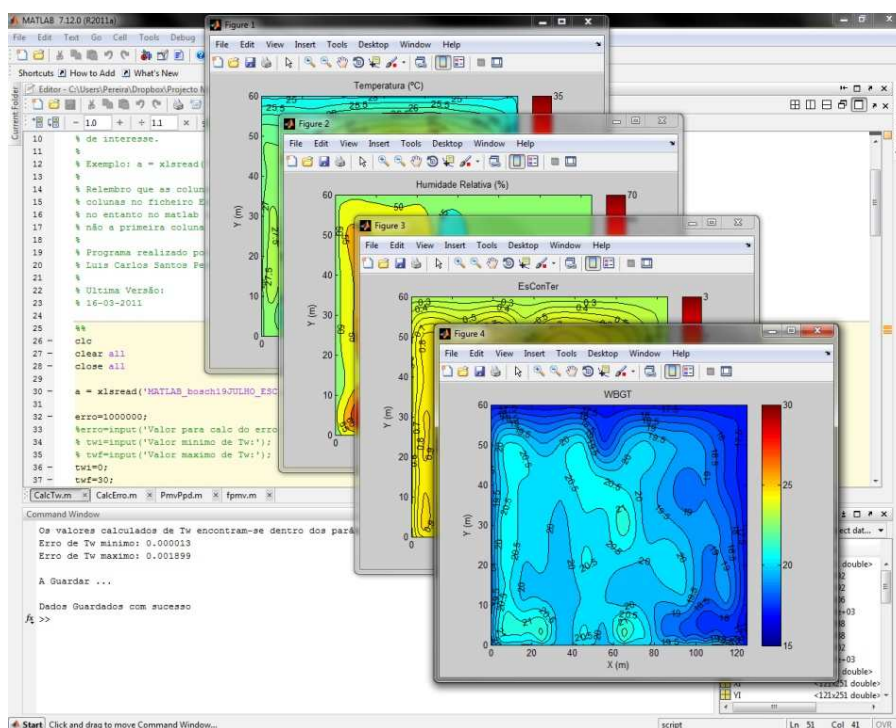


Figura 5— Uma imagem no monitor de uma corrida do Algoritmo “A”.

4.4.3. Construção do algoritmo “B”

Conforme referido anteriormente é possível avaliar o conforto / desconforto através da aplicação da equação do balanço energético para um ser humano. Nestes termos foi desenvolvido

Conforto e desconforto térmico numa nave industrial – Estudo exploratório

Metodologia

um novo algoritmo que é desenhado tendo por base a descrição e formulário apresentados na secção (3.2.5).

O algoritmo foi construído baseado num balanço energético e utiliza o mesmo princípio de aquisição de dados que o algoritmo “A”.

Através da aplicação do algoritmo “B” são valorizados os seguintes factores: metabolismo, trabalho, difusão de vapor, transpiração, respiração latente, respiração sensível, radiação, convecção, índice *PMV* e índice *PPD*.

Para o cálculo dos valores correspondentes a T_{CL} e h_c o algoritmo “B” recorre a uma função cíclica criada para gerar estes dois valores e que são depois introduzidos nas equações correspondentes.

O algoritmo tem a vantagem de indicar os resultados finais para transferência de energia sob a forma de calor por evaporação dados pela difusão de vapor, transpiração, respiração latente e respiração sensível.

Também é criada uma informação relevante acerca da transferência de energia sob diferentes formas de calor por radiação, por convecção e por evaporação. A transferência de energia sob a forma de calor por condução, devida a pouca área de contacto de um ser humano com outras superfícies (os pés), foi desprezada.

A título de exemplo, mostra-se na Figura 6 uma imagem que é observada no monitor do computador, durante a operação analisada do algoritmo “B”.

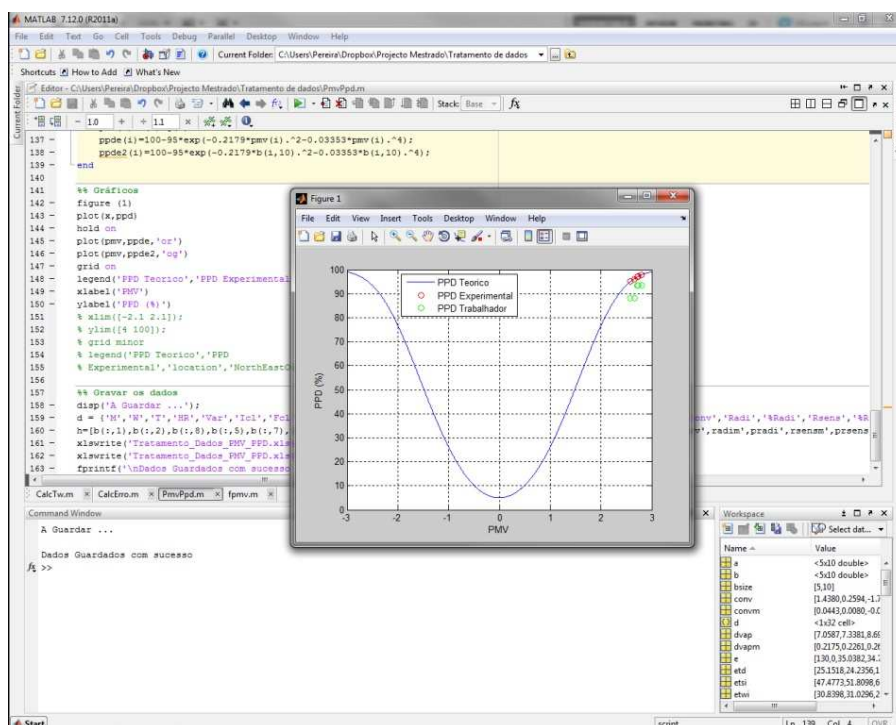


Figura 6 — Uma imagem no monitor de uma corrida do Algoritmo “B”.

5. Resultados e discussão

5.1. Introdução

Neste capítulo vão ser mostrada algumas análises que foram realizadas a partir dos dados registados nos postos de observação da nave industrial, de um outro local e de valores disponíveis em literatura da especialidade.

Como estratégia de apresentação, consideramos oportuno descrever em cada um os objectivos de aplicação, mapas criados, interpretação de resultados, considerações e comparações sempre que oportuno.

5.2. Índices *ITH* e *EsConTer*

5.2.1. Introdução

A necessidade em conhecer os padrões da nave investigada permitiu fazer um estudo exploratório. São apresentadas algumas figuras e os padrões obtidos são interpretados.

5.2.2. Resultados / considerações

Por opção foram usados dois índices térmicos, nomeadamente o Índice *ITH* ou Índice de Temperatura e Humidade (tradução do inglês Temperature Humidity Index) (Nieuwolt, 1977) e o Índice *EsConTer* (Talaia & Simões, 2009), basicamente por serem considerados de fácil aplicação.

A Figura 7 mostra o padrão térmico da nave industrial, para as 11 horas do dia 11 de Maio de 2010.

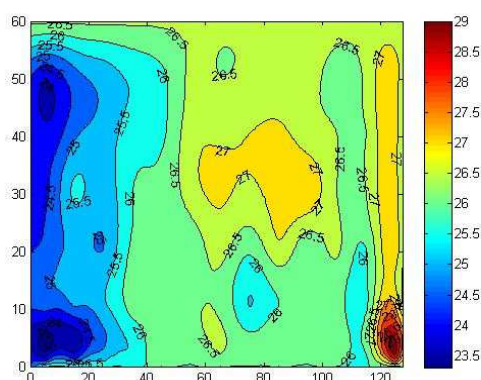


Figura 7 — Mapa térmico no interior da nave (dia 11 de Maio de 2010)

A observação da Figura 7 mostra que existem zonas na nave com temperaturas bastante altas a rondar os 29°C. Há uma zona central com valores de cerca de 27°C. A figura inerente à humidade relativa mostra ser complementar a esta, ou seja, como é sabido quando a temperatura aumenta a humidade relativa do ar diminui e vice-versa. Estas figuras mostraram que os instrumentos de medida registaram valores que consideramos válidos.

Quando aos dados registados é aplicado o índice *ITH* obtém-se a imagem do lado esquerdo da Figura 8 e quando é aplicado o índice *EsConTer* obtém-se a imagem do lado direito da Figura 8. A observação visual da Figura 8 mostra que há concordância de zonas consideradas mais vulneráveis a desconforto e capazes de provocar desconforto térmico. Zonas cuja localização está próxima dos valores, abcissa 65m e ordenada 5m; abcissa 95m e ordenada 30m e abcissa 125m e ordenada 5m, de acordo com o referencial definido.

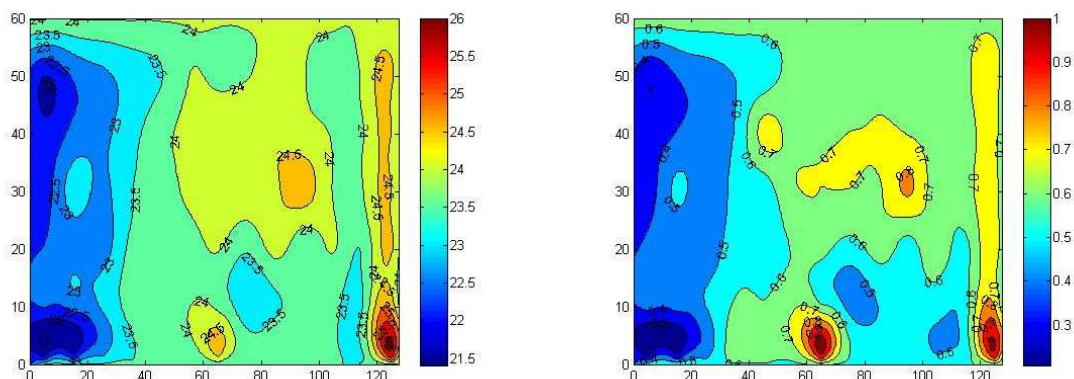


Figura 8 — Mapas de conforto / desconforto *ITH* e *EsConTer*

Os resultados obtidos, mesmo sendo exploratórios, permitiram conhecer na nave industrial potenciais zonas vulneráveis a desconforto térmico (Pereira & Talaia, 2010).

5.3. Índices *WBGT* e *EsConTer*

5.3.1. Introdução

Nesta secção estamos particularmente interessados em conhecer os resultados quando se aplicam aos dados registados o índice *WBGT* e o índice *EsConTer*. É também um objectivo avaliar se a aplicação do índice *EsConTer* responde à caracterização de um ambiente.

5.3.2. Resultados / considerações

Para o dia 16 de Julho de 2010 registaram-se dados às 15h. Os dados foram tratados e geraram diferentes figuras que mostram padrões obtidos.

A Figura 9 mostra o mapa térmico construído com base nos valores registados para a temperatura do ar. A observação visual das linhas (isotérmicas) e das cores permite conhecer as zonas de trabalho que estão sujeitas a uma maior temperatura, o que equivale afirmar poderem tratar-se de zonas mais vulneráveis a desconforto térmico.

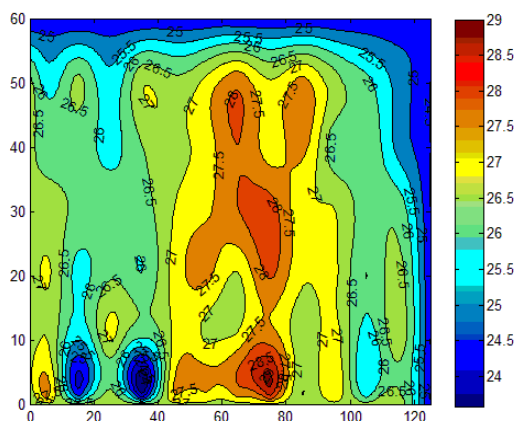


Figura 9 — Mapa térmico no interior da nave (dia 16 de Julho de 2010)

Na Figura 10 mostra-se o padrão obtido para a humidade relativa do ar, no interior da nave, para a mesma hora e dia. A observação visual mostra que o resultado é correcto. Na prática, é sabido que quando a temperatura do ar aumenta a humidade relativa do ar diminui. Ou seja, se a pressão parcial de saturação do vapor de água à temperatura do ponto de orvalho for assumida como uma constante e se a pressão parcial de saturação do vapor de água aumentar devido ao aumento da temperatura do ar, a humidade relativa do ar diminui. Esta situação é observada quando se comparam as Figura 9 e Figura 10.

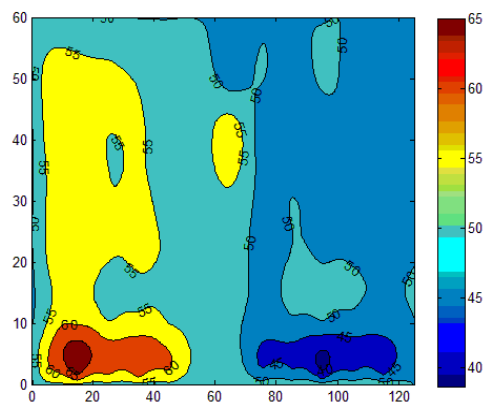


Figura 10 — Mapa da humidade relativa do ar (dia 16 de Julho de 2010)

O padrão de conforto / desconforto foi avaliado através da aplicação do índice *WBGT* e do índice *EsConTer*.

A Figura 11 mostra o padrão obtido quando se usa o índice *WBGT* e a Figura 12 mostra o padrão obtido quando se usa o índice *EsConTer*. A observação visual das figuras mostra, de forma inequívoca, que o padrão obtido é concordante, como seria esperado, o que valida a aplicabilidade de qualquer índice a um ambiente térmico.

Na Figura 11 e na Figura 12, as zonas de cor “vermelho” suscitam condições de ambiente mais quente, sujeitas a um desconforto térmico.

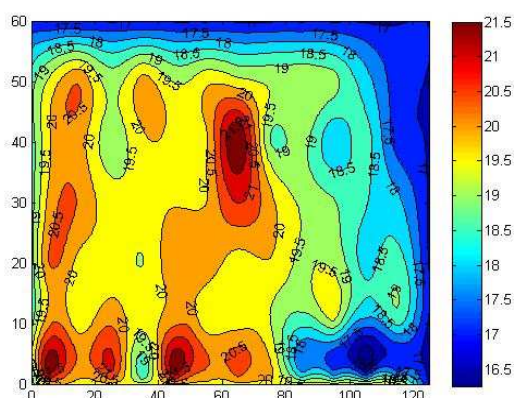


Figura 11 — Padrão obtido usando o índice *WBGT* (dia 16 de Julho de 2010)

É de salientar que a aplicação do índice *EsConTer* usando apenas a temperatura do ar e temperatura do termómetro molhado oferece um excelente resultado para a adopção de estratégias de intervenção. De facto, a velocidade do vento no interior da nave não altera os resultados obtidos, por ser considerada desprezável (sempre inferior a $0,2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

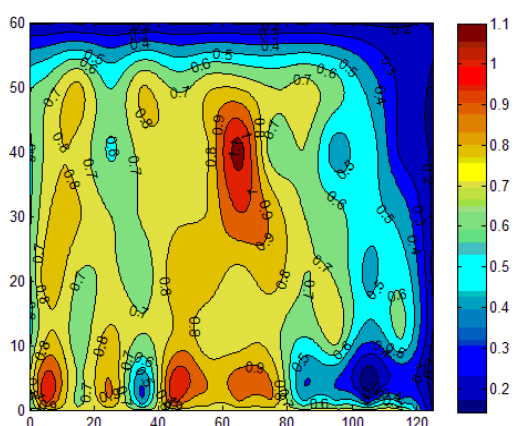


Figura 12 — Padrão obtido usando o índice *EsConTer* (dia 16 de Julho de 2010)

A análise de resultados para o dia 16 de Julho mostra que existem na implantação da linha de montagem da unidade fabril, zonas susceptíveis de maior desconforto (Pereira & Talaia, 2011a).

Um estudo idêntico foi realizado para o dia 19 de Julho.

Na Figura 13 a imagem do lado esquerdo indica o padrão da humidade relativa do ar e a imagem do lado direito indica a temperatura do ar.

A observação visual da Figura 13 mostra que há uma relação entre a humidade relativa do ar e a temperatura do ar, ou seja quando a temperatura do ar aumenta a humidade relativa do ar diminui e vice-versa. É de notar que a pressão parcial de saturação do vapor de água à temperatura do ponto de orvalho é sensivelmente constante, como seria esperado.

Por outro lado, por não se definir um padrão de cor através de uma escala de cor, as imagens mostram sempre a cor vermelha, em zonas que indiciam os valores mais elevados. Esta situação depende dos valores registados no momento da recolha da colecção de dados.

Conforto e desconforto térmico numa nave industrial – Estudo exploratório

Resultados e discussão

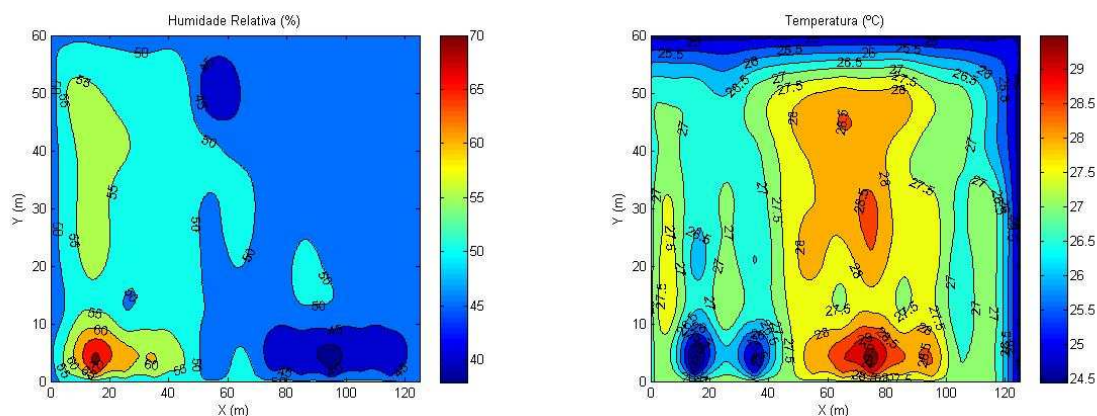


Figura 13 — Padrão para a humidade relativa do ar e da temperatura do ar.

A Figura 14 mostra duas imagens. A imagem do lado esquerdo mostra o padrão de conforto / desconforto quando se aplica aos dados registados o índice *WBGT* e a imagem do lado direito mostra o padrão de conforto / desconforto quando se aplica o índice *EsConTer*.

A zona de cor “vermelha” indicia zonas vulneráveis, no entanto, é bom ter o devido cuidado que a informação da cor pode não ser indício de zona de desconforto térmico. Chamamos a atenção que estas imagens foram obtidas sem limitação de fronteira de valores e de cor, e esta situação parece ter sido normal e aceite em alguns estudos publicados (Rodrigues, 2007). Do nosso ponto de vista, parece-nos importante inovar por se criar padrões no interior de uma nave industrial com valores associados a cores. Normalmente, em termos de informação de conforto / desconforto, os técnicos de avaliação consideram apenas pontos casuísticos que poderão não corresponder a uma realidade. No geral são usados equipamentos que avaliam o índice *WBGT* e são apenas registados dados num posto de trabalho. A vantagem do padrão é visualizar as zonas onde poderão ser susceptíveis de indiciar desconforto térmico.

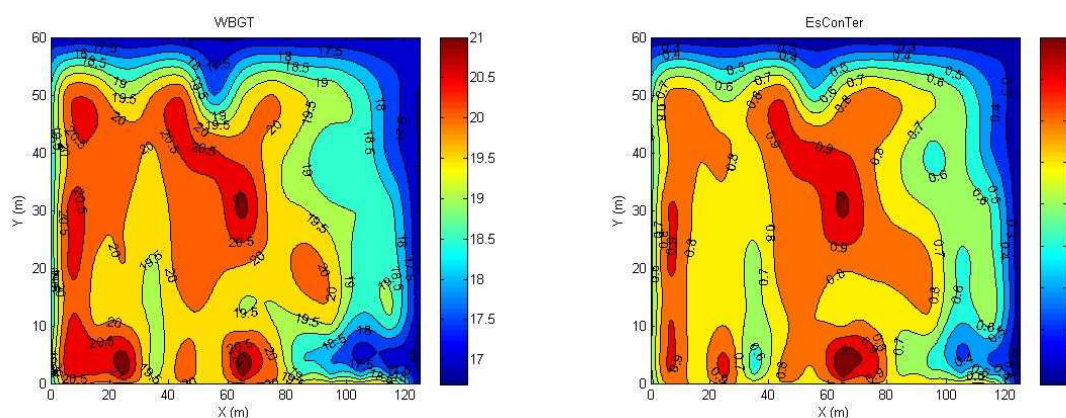


Figura 14 — Padrão térmico usando o índice *WBGT* e o índice *EsConTer*.

Neste trabalho, por considerarmos importante e oportuno e para que as imagens de padrão obtida pudessem ser interpretadas com rapidez através de observação visual, em função de valores

tabelados para conforto / desconforto térmico, as figuras foram desenhadas (através da alteração do algoritmo) para uma escala de cor comum a todas as imagens.

Nestes termos, a análise de dados registados, permitiu considerar uma gama para a humidade relativa do ar de 20% a 100%. A região de Aveiro, onde esta localizada a nave industrial, é caracterizada ao longo do ano por uma humidade relativa suficientemente alta. Há uma envolvimento de grandes massas de água que favorecem uma evaporação activa e uma injeção de vapor de água na atmosfera.

A gama de temperatura do ar teve em consideração temperaturas registadas no interior da nave ao longo do ano.

Construíram-se duas novas imagens, como se mostra na Figura 15.

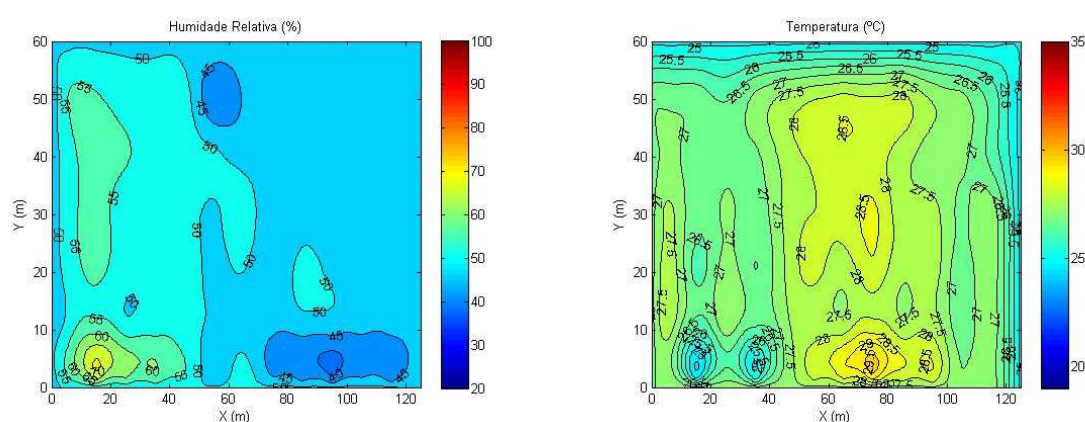


Figura 15 — Padrão para a humidade relativa do ar e da temperatura do ar, numa escala pré definida de cor.

A vantagem da Figura 15 em face da Figura 13 é a interpretação imediata e física da situação da humidade relativa e temperatura do ar. A imagem do lado direito da Figura 15 mostra, em contraste com a imagem do mesmo lado da Figura 13, que a inexistência de zonas com cor “vermelha” mostra que a temperatura não indica zonas que favoreçam situações de desconforto térmico.

A Figura 16 mostra o padrão para o índice *WBGT* e para o índice *EsConTer*. A observação da imagem do lado esquerdo mostra que o valor mais elevado do índice *WBGT* está longe dos valores aceites para desconforto térmico, ou seja, para trabalho aclimatizado de $WBGT = 30^{\circ}\text{C}$ (para uma velocidade de vento inferior a 1,5m/s, trabalho manual leve de metabolismo superior a $65\text{W}/\text{m}^2$ e inferior a $130\text{W}/\text{m}^2$) e de $WBGT = 27,8^{\circ}\text{C}$ (para uma velocidade de vento inferior a 1,5m/s, trabalho braçal moderado de metabolismo superior a $130\text{W}/\text{m}^2$ e inferior a $200\text{W}/\text{m}^2$). O valor mais elevado registado para *WBGT* foi cerca de 21°C . Este valor não sugere preocupação. O padrão do índice *EsConTer* mostra que o valor mais alto registado é muito inferior ao valor 3 que caracteriza a cor “vermelha”, o que indicia uma zona de calor moderado, que não suscita tomada de estratégias de intervenção.

Conforto e desconforto térmico numa nave industrial – Estudo exploratório

Resultados e discussão

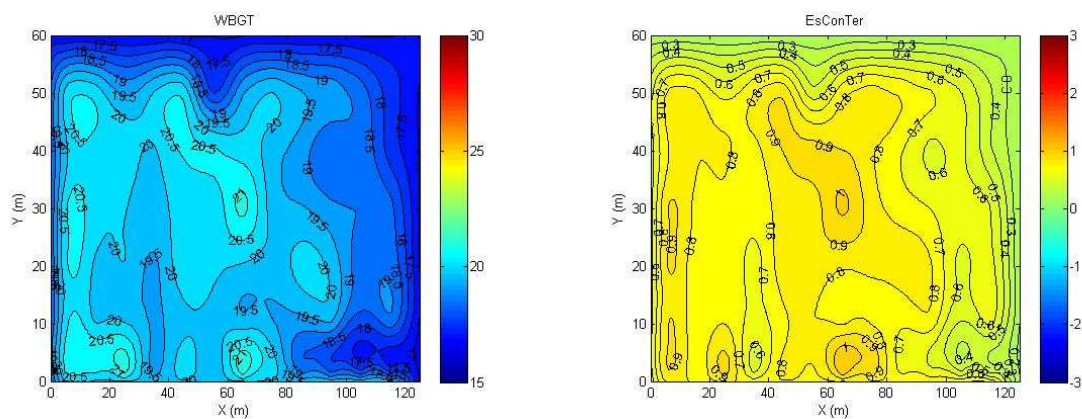


Figura 16 — Padrão para o índice o índice *WBGT* e para o índice *EsConTer*.

Para se compreender a grande vantagem da escala de cores comum, observemos a Figura 17 e Figura 18, onde são colocados na mesma figura os índices *WBGT* e *EsConTer*.

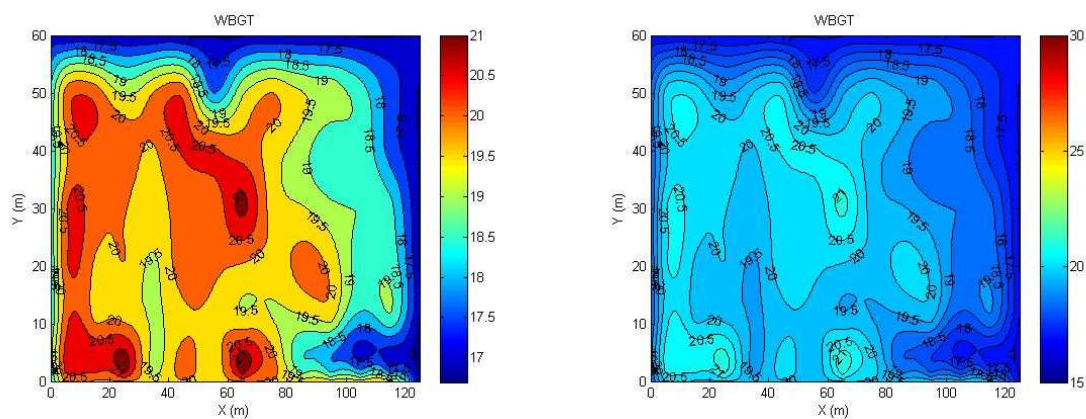


Figura 17 — Índice *WBGT*. Comparação através da estratégia do uso de uma escala comum de cor.

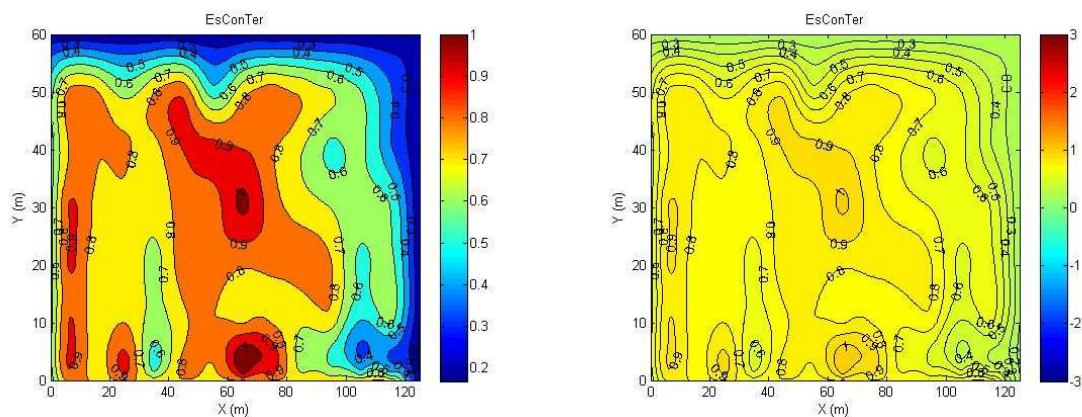


Figura 18 — Índice *EsConTer*. Comparação através da estratégia do uso de uma escala comum de cor.

A observação visual atenta da Figura 17 e da Figura 18 mostra, de forma inequívoca, que a consulta a tabelas em termos de valores tabelados é dispensável, pois a escala de cor condiciona as considerações a assumir. Esta é a grande vantagem da estratégia assumida neste estudo, em ser usada uma escala de cores definida por situação de desconforto térmico.

Na prática o índice *WBGT* mostra que a cor de fundo em tom “azul” está longe dos valores de preocupação (acima de 27,5°C) que são condicionados pelas cores de “nuances” avermelhadas.

O índice *EsConTer* mostra uma excelente concordância com o índice *WBGT* e indica que a cor de fundo em tom “amarela” está longe dos valores de preocupação próximos de +3, cor “vermelha”, para ambiente demasiado quente.

Pode-se afirmar que a aplicação do índice *WBGT* e do índice *EsConTer* parece ser indiferente, dado que há uma excelente concordância nas considerações a retirar da interpretação das cores (Pereira & Talaia, 2011b). Nestes termos, consideramos oportuno afirmar que o índice *EsConTer*, por ser mais fácil e por exigir equipamento muito mais simples e mais económico em face do índice *WBGT*, deve ser valorizado em estudos de conforto / desconforto.

Devido à grande aplicação do índice *WBGT* foi feita uma avaliação do diagrama de conforto / desconforto da W.M.O. (1987) de modo a conhecer a sua limitação. O resultado é mostrado na Figura 19, onde são apresentados os valores registados por dois instrumentos de medida diferentes em termos de resposta.

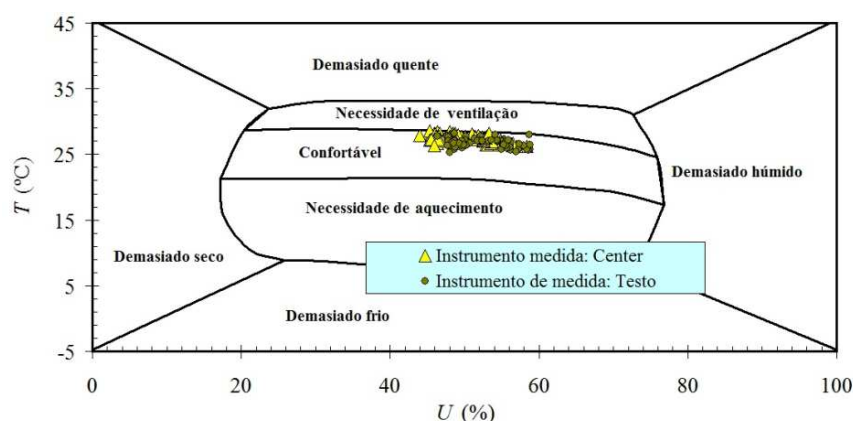


Figura 19 — Resultado obtido a partir da aplicação do diagrama da W.M.O. (1987), para o dia 16 de Julho de 2010.

A observação da Figura 19 mostra que durante o registo de valores não se detectam zonas vulneráveis para valorização em termos de estratégia de intervenção. As situações são de conforto térmico, o que valida um diagrama de dupla entrada de duas variáveis de fácil registo. A desvantagem que se encontra na aplicação do diagrama da W.M.O. em face da estratégia usada na criação de um padrão é não informar a localização do local em desconforto térmico.

5.4. Índice *PMV* e índice *PPD*

5.4.1. Introdução

Consideramos oportuno apresentar um estudo realizado num local, tipo escritório, que permitiu compreender a aplicação da norma ISO 7730 (2005).

Este estudo tem a vantagem de ser considerada a equação de balanço energético aplicada ao ser humano, quando está presente transferência de energia sob a forma de calor por radiação, condução, convecção e evaporação. A actividade, função do metabolismo, é valorizada assim como o vestuário usado.

Foi usada uma escala de cores para ser indicada a sensação térmica do indivíduo, uma escala sétima de ASHRAE (2001, 2004) e dois psicrómetros, um localizado no interior e outro localizado no exterior do local seleccionado. Foram registadas a temperatura do ar e a temperatura do termómetro molhado, em diferentes horas do dia e em dias diferentes.

Para se compreender a influência do ambiente exterior em relação ao ambiente interior usou-se um índice térmico de fácil aplicação denominado *ITE*, índice de temperatura efectiva.

Os resultados obtidos, para o interior do local, foram posteriormente comparados com as informações retiradas da aplicação do diagrama da W.M.O. (1987).

5.4.2. Resultados / considerações

Para se compreender a influência de um ambiente exterior num ambiente interior, determinaram-se os valores do índice *ITE* para o exterior e interior, do local de estudo.

A Figura 20 mostra como o índice *ITE* interior e exterior a um local evolui no tempo. A observação da figura indica que o exterior do local apresenta sempre valores inferiores de *ITE*. Esta situação está em concordância com a altura do ano em que se registaram os valores (durante o mês de Novembro, de 2010).

A interpretação do índice *ITE* para o interior do local sugere que uma maioria das situações se encontrava na zona de conforto térmico. O mesmo não aconteceu com o ambiente exterior que sugeria como estratégia de intervenção o aquecimento ou o aumento de temperatura.

A interpretação física do ar húmido interior e exterior ao local de estudo mostra que a forma de construção e a escolha de materiais de construção de um edifício são factores condicionantes para o conforto do ser humano. Já Leucz (2001) e Rebelo *e tal.* (2008) referiram que o ambiente térmico em salas de aula, condicionado em grande parte pelos materiais de construção, é um factor que influencia o ensino e a aprendizagem. Na prática, o ciclo diurno da radiação solar é um factor determinante para condicionar um ambiente de conforto / desconforto de um local.

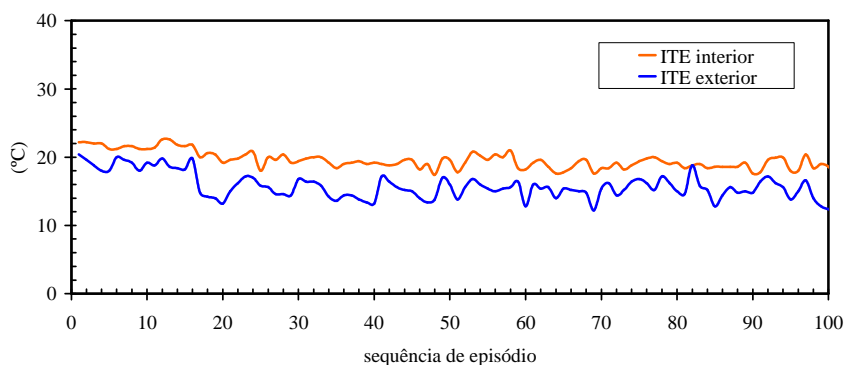


Figura 20 — *ITE* interior e *ITE* exterior o local de estudo.

Por ser de fácil aplicação e por indicar estratégias de intervenção foi aplicado aos dados registados e para o interior do local, o diagrama de duas entradas (temperatura do ar e humidade relativa do ar) da World Meteorological Organization (W.M.O., 1987).

Na Figura 21 indicam-se em círculos de cor “tijolo claro” os dados registados e a sua localização.

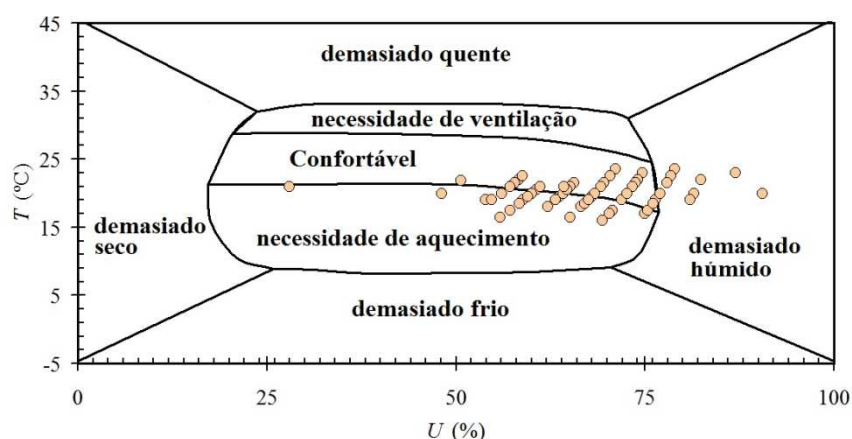


Figura 21 — Diagrama de conforto/desconforto (adaptado da W.M.O., 1987).

A observação visual da Figura 21 mostra que há situações em que se está em presença de um ar demasiado húmido (nesta situação, para se tornar um ambiente confortável, como estratégia de intervenção, seria necessário desumidificar o ar mantendo a temperatura do ar. Equivale a afirmar que a temperatura do ponto de orvalho deveria diminuir, obrigando à uma diminuição da pressão parcial de vapor de água de saturação à temperatura do ponto de orvalho). Há situações em que se está em presença de um ar com necessidade de aquecimento (nesta situação bastaria aumentar a temperatura do ar). É de salientar que o aumento da temperatura do ar provoca uma diminuição da humidade relativa do ar, por aumentar a pressão parcial de saturação do vapor de água à temperatura do ar. Nestas circunstâncias a temperatura do ponto de orvalho pode manter-se inalterável. As restantes situações indiciam um ambiente confortável. Estes resultados estão em concordância com a interpretação física feita quando se aplicou o índice *ITE*.

Aos dados registados, aplicaram-se os índices *PPD* e *PMV*. Estes consideram a equação de balanço energético do ser humano.

O algoritmo “B”, desenvolvido e construído a partir das expressões da norma ISO 7730 (2005), foi usado e foi possível obter os valores que se indicam na Figura 22 com círculos de cor “lilás”. Na figura também é indicada a linha modelo da norma ISO 7730.

Conforto e desconforto térmico numa nave industrial – Estudo exploratório

Resultados e discussão

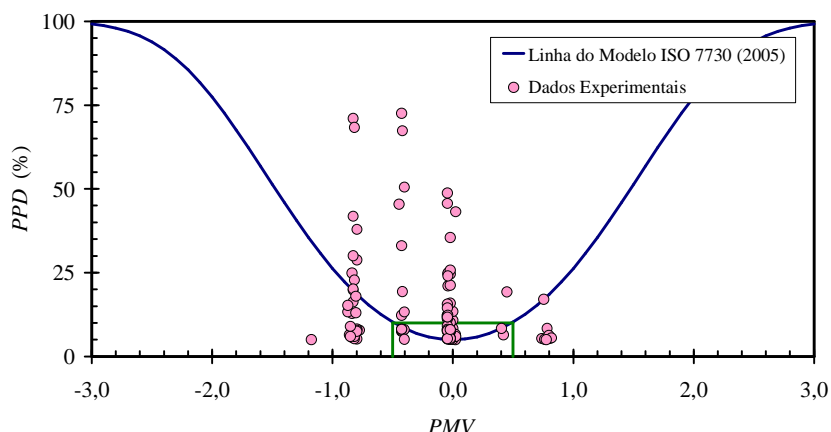


Figura 22 — Conforto / desconforto (ISO 7730, 2005).

A observação visual da Figura 22 mostra que os pontos registados a partir do par de valores (PPD e PMV) apresentam uma sensação térmica diferente, em face da linha teórica do modelo. Há situações que estão localizadas ao longo da linha para um PMV entre -1 e $+1$ (ligeiramente frio e ligeiramente quente). Há um conjunto interessante de situações que está incluído na zona de conforto. Existe, no entanto, uma maior densidade de pontos que necessitam de estratégias de intervenção na zona de frio, por aquecimento ou por desumidificação.

Os resultados obtidos e indicados na Figura 22 estão em concordância com as estratégias indicadas por aplicação do diagrama de conforto / desconforto da W.M.O (1987).

Construímos a Figura 23 por a considerarmos de grande utilidade na comparação dos valores obtidos e na aplicação dos índices $EsConTer$, PMV (da norma ISO 7730) e Escala de Percepção Térmica. Na figura estão indicadas três linhas de diferente cor: uma linha de cor “azul” que determina o valor da Escala Percepção Térmica (é o valor indicado na escala de cores), uma linha de cor “vermelha” que indica os valores determinados quando se aplicam aos dados registados o índice $EsConTer$ e, por último, uma linha de cor “castanha” que indica os valores de PMV , segundo a norma ISO (ISO 7730, 2005).

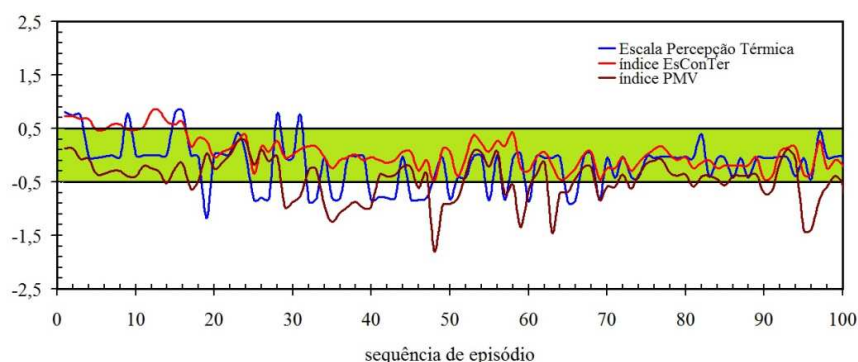


Figura 23 — Diferentes estratégias para a avaliação de conforto/desconforto.

A observação visual da Figura 23 mostra ainda uma banda de cor “verde” limitada entre os valores $-0,5$ e $+0,5$ que indicia zona de conforto. É de notar que as linhas desenhadas no tempo, na sequência de cada episódio registado, mostram inequivocamente quais as situações de

desconforto. As conclusões derivadas da observação visual e analítica da Figura 23 mostram que há situações que indiciam conforto, mas que há situações que indiciam estratégias de intervenção. Estas considerações são corroboradas com as interpretações anteriormente descritas (Pereira *et al.*, 2011).

Por outro lado, é sabido que o vestuário tem influência na sensação térmica de cada indivíduo (Tabela 8 do Anexo). Neste trabalho usou-se como indicador a temperatura operativa. Esta é definida como uma temperatura uniforme de um ambiente negro imaginário no qual o ser humano poderia trocar a mesma quantidade de energia sob a forma de calor por radiação e convecção que no ambiente real não uniforme.

A Figura 24 mostra como para uma actividade escolhida e o vestuário (na unidade de clo) pode influenciar a sensação térmica de um ser humano.

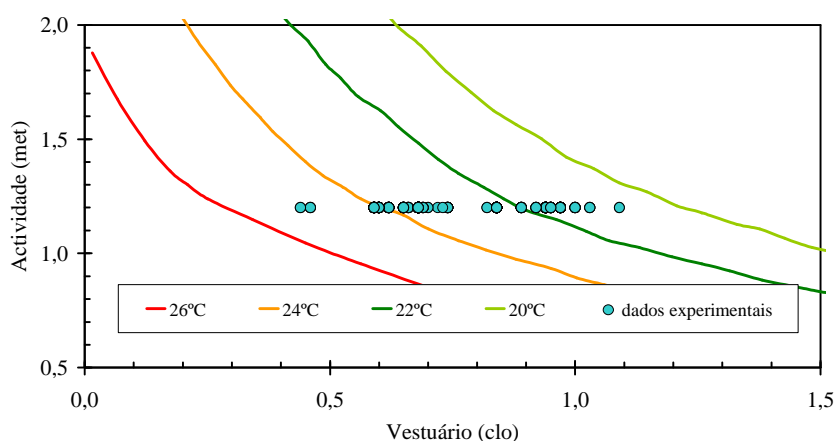


Figura 24 — Temperatura operativa: relação entre actividade e vestuário.

A observação da Figura 24 mostra que sendo a actividade considerada a mesma em todas as situações, portanto de valor constante, é apenas o vestuário que condiciona a temperatura operativa. Para um valor de clo (medida de vestuário) mais alto a temperatura operativa é mais baixa, como seria esperado. Na prática o vestuário condiciona as perdas de energia sob a forma de calor para o ambiente circundante.

Na determinação do índice *PMV* e *PPD* foi usada a equação do balanço energético (Pereira, *e tal.*, 2011). Na Tabela 6 são indicados os valores médios e respectivos erros associados para a transferência de energia sob a forma de calor por evaporação e que contribuições condicionarem esse valor.

Tabela 6 — Valores médios e desvio padrão para transferência de energia sob a forma de calor por evaporação

| Difusão de vapor | | Transpiração | | Respiração latente | | Respiração sensível | | Evaporação | |
|------------------|---------------|--------------|---------------|--------------------|---------------|---------------------|---------------|------------|---------------|
| Média | Desvio padrão | Média | Desvio padrão | Média | Desvio padrão | Média | Desvio padrão | Média | Desvio padrão |
| 13,93 | 1,47 | 6,28 | 0,66 | 6,37 | 0,64 | 1,71 | 0,15 | 28,29 | 2,71 |

A coluna do lado direito da Tabela 4 indica o somatório dos valores obtidos por difusão de vapor, transpiração, respiração latente e respiração sensível.

Na Tabela 7 são indicados os valores inerentes à transferência de energia sob a forma de calor por radiação (36,19%), por convecção (35,53%) e por evaporação (28,29%). Lembra-se que a transferência de energia sob a forma de calor por condução, devida a pouca área de contacto, foi desprezada.

Tabela 7— Valores médios e desvio padrão para transferência de energia sob diferentes formas de calor

| Radiação | | Convecção | | Evaporação | |
|-----------------|---------------|------------------|---------------|-------------------|---------------|
| Média | Desvio padrão | Média | Desvio padrão | Média | Desvio padrão |
| 36,19 | 1,05 | 35,52 | 1,81 | 28,29 | 2,71 |

5.5. Aplicação da norma ISO 7730 (2005) a um posto de trabalho

5.5.1. Introdução

Não foi a impossibilidade em se registar valores num posto de trabalho na nave industrial, que impediu aplicar o algoritmo “B” na avaliamos a performance de conforto / desconforto num posto de trabalho de um trabalhador. A pesquisa realizada na literatura disponível, mostrou que Rodrigues (2007) disponibilizou dados inerentes ao desconforto de um posto de trabalho e para um dia, em tabela sem os ter trabalhado em termos de balanço energético.

Consideramos ser oportuno usarmos os dados indicados na Tabela 5.3.02, página 156 do trabalho de Rodrigues (2007) e correr o algoritmo desenvolvido neste trabalho.

A Figura 25 mostra os valores indicados em tabela por Rodrigues (2007), para dois postos de trabalho sujeitos a *stress* térmico, numa nave industrial de uma linha de montagem do sector metalomecânico.

O nosso objectivo é avaliar as duas indicações da tabela acerca da escala de cores da sensação térmica do operador (ver Figura 2) e da indicação da norma ISO 7730 (ver Figura 3).

| | 12h00 | 14h00 | 16h00 | 18h00 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| T (°C) | 31 | 31,5 | 32,0 | 35,0 |
| E_{AS} | 2 | 2 | 2 | 2 |
| E_{COR} | 2,71 | 2,71 | 2,90 | 2,92 |
| IC | 1,8 | 1,7 | 1,7 | 1,9 |
| $WBGT$ (°C) | 27,8 | 28,1 | 28,1 | 28,8 |

| | 12h00 | 14h00 | 16h00 | 18h00 | 20h00 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| T (°C) | 31,3 | 32,8 | 35,4 | 36,3 | 34,7 |
| T_w (°C) | 24,1 | 24,2 | 23,3 | 23,7 | 23,5 |
| HR (%) | 52,9 | 46,7 | 32,8 | 31,7 | 36,0 |
| $WBGT$ (°C) | 27,3 | 27,8 | 28,0 | 28,5 | 27,9 |
| E_{AS} | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| E_{COR} | 2,3 | 2,3 | 2,5 | 2,5 | 2,5 |

Figura 25 — Valores registados em dois postos de trabalho [adaptado de Rodrigues (2007)].

5.5.2. Resultados / comentários

A aplicação do Algoritmo “B” aos dados indicados ao posto de trabalho 46 permitiu obter a Figura 26. Na figura a linha de cor “azul” é relativa ao modelo da norma ISO 7730 (2005), os círculos de cor “vermelha” a partir da aplicação do Algoritmo “B” e os círculos de cor “verde” a partir do uso da Escala Térmica de cor (ver Figura 2).

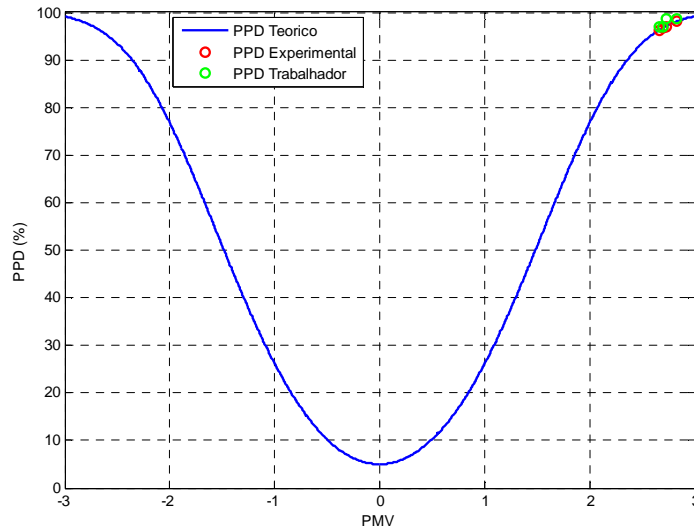


Figura 26 — Sensação de conforto / desconforto aplicando a norma ISO e a escala térmica de cor (posto trabalho 46).

Na Figura 27 são indicados os valores obtidos para o posto de trabalho 57. As considerações de leitura deste gráfico seguem as descritas para o posto de trabalho 46.

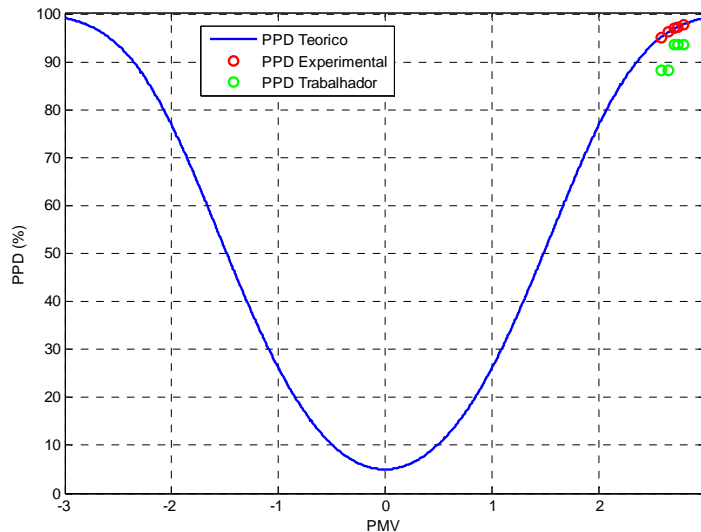


Figura 27 — Sensação de conforto / desconforto aplicando a norma ISO e a escala térmica de cor (posto trabalho 57).

A observação visual das Figura 26 e Figura 27 mostra de forma inequívoca que o Algoritmo “B” desenvolvido neste trabalho determina valores muito próximos da informação da sensação térmica definida pelo trabalhador.

Conforto e desconforto térmico numa nave industrial – Estudo exploratório

Resultados e discussão

A Figura 28 oferece uma informação imediata acerca da interpretação da sensação térmica de um indivíduo.

Nestes termos, quer o trabalhador do posto de trabalho 46 quer o trabalhador do posto de trabalho 57 encontram-se num ambiente demasiado quente e nestas circunstâncias a exigir tomada de estratégias de intervenção.

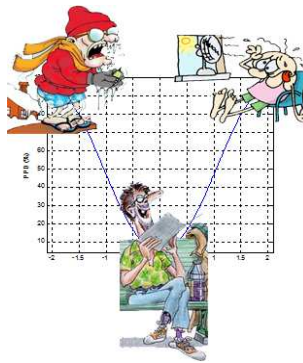


Figura 28 — Sensação de conforto / desconforto quando se aplica a norma ISO 7730 (2005).

6. Considerações finais e perspectivas futuras

A aplicabilidade dos métodos usados nesta dissertação só foi viável, em parte, por ter havido interesse e disponibilidade de uma unidade fabril de grandes dimensões, localizada na região de Aveiro. Na prática, foi suscitado interesse da unidade fabril em conhecer a sensação térmica de uma nave e como se indicavam zonas vulneráveis para desconforto térmico, mesmo considerando que a nave estava sob sistema de climatização.

A necessidade de um trabalho nesta área e numa unidade fabril é um forte alicerce no sentido de se obterem mapas de padrão capazes de serem valorizados pela D.H.S., por permitirem conhecer a sensação térmica num posto de trabalho de modo a serem criadas as melhores condições de sensação térmica para melhorar os índices de produção e de qualidade, reduzindo o absentismo e eventuais acidentes de trabalho.

Foram construídos mapas dinâmicos ao longo do tempo para se conhecer melhor a sensação de conforto / desconforto no interior da nave.

Os resultados obtidos confirmam que a unidade de climatização instalada na nave permite criar condições térmicas no trabalhador que não necessitam de valorização por parte da D.H.S. No entanto, é bom ressaltar que os dias seleccionados, para registo de dados, foram previamente seleccionados em função das condições “*outdoor*”. No entanto, em nenhuma situação se registou desconforto térmico a necessitar de intervenção.

Não foi possível em locais de maior vulnerabilidade da unidade fabril avaliar a sensação térmica durante o dia, para diferentes trabalhadores. Nestas circunstâncias, considerou-se oportuno valorizar alguns dados registados e disponíveis na literatura da especialidade.

Um estudo de caso foi também avaliado, como complemento ao estudo realizado na nave industrial. Os resultados obtidos confirmaram a aplicabilidade do Algoritmo “B” em face dos registos de sensação térmica indicados numa escala térmica de cor e onde a roupa usada foi considerada.

Os resultados mostraram, ainda, que as condições higrométricas interiores de um local “*in door*” são condicionadas pelas condições higrométricas exteriores “*out door*”.

No geral, podemos afirmar que os resultados obtidos quando se usam diferentes métodos ou índices ou diagramas foram concordantes, e que o índice *EsConTer* e o diagrama da W.M.O. devem ser valorizados em futuros estudos, quando a velocidade do ar regista valores desprezáveis.

Em termos de trabalho futuro seria muito interessante criar diferentes padrões no tempo e fazer uma aplicação dos algoritmos, agora criados, para ambiente quente e também para ambiente frio. Uma análise diária, mensal e anual seria o melhor alicerce para o conhecimento do ambiente térmico de um local. Seria também muito importante valorizar a opinião do trabalhador e investigar a relação entre a sensação térmica facultada por modelos e a indicada pelo trabalhador. No entanto, reconhecemos a dificuldade que a indústria coloca em permitir que o trabalhador colabore num projecto desta dimensão. Há algumas justificações, uma delas tem a ver com a influência que uma paragem provoca numa linha de montagem. No entanto, somos de opinião que o benefício seria muito maior em comparação com o prejuízo.

Uma estratégia muito interessante, que se espera ser trabalhada em termos de futuro, será a aplicação do diagrama psicrométrico numa ligação ao diagrama de conforto da W.M.O. A vantagem é em termos da visualização num monitor a sensação térmica prevista de modo a ser adoptada pela D.H.S. medidas de prevenção.

Esta dissertação mostra que um elo entre a meteorologia, a indústria, a medicina e a escolha de materiais de construção é e seria muito importante e oportuno em projectos futuros.

Bibliografia

- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers – ASHRAE (2001). *Handbook of Fundamentals - Physiological Principles for Comfort and Health*. Chapter 8, Atlanta, 1-32.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers – ASHRAE 55 (2004). *Thermal environmental conditions for human occupancy*, ISBN/ISSN: 1041-2336.
- Butera, F.M. (1998). Chapter 3 – Principles of thermal comfort, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39-66.
- Charles, K. (2003), *Fanger's Thermal Comfort and Draught Models*, Institute for Research in Construction National Research Council of Canada, Canada.
- Corleto, R. (1998). *The evaluating of Heat Stress indices using physiological comparisons in an alumina refinery in a sub – tropical climate*. Master Science Thesis, Faculty of Science and Technology at Deakin University, Geelong, Australia, 176.
- Dubois, D., Dubois, E.F. (1916). A formula to estimate approximate surface area, if height and weight are known. *Archives of Internal Medicine*, 17, 863-875.
- Davidovits, P. (2008). *Physics in Biology and Medicine*. Academic Press.
- Emmanuel, R. (2005). Thermal comfort implications of urbanization in warm – humid city: the Colombo Metropolitan Region (CMR). *Building and Environment*, 40, 1591–1601
- Fanger, P. (1972). *Thermal Comfort*. McGraw-Hill. New-York, 2° ed.
- Houghten & Yaglou (1923). ASHVE Research Report No 673, *ASHVE Transactions*, 29, 361.
- Huang, J. (2006). Thermal parameters for assessing thermal properties of clothing. *Journal of Thermal Biology*, 31, 461–466.
- International Organization for Standardization (1989). ISO 7243/1989. *Hot environments – Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature)*. International Standardization Organization, Geneva, Suisse.
- International Organization for Standardization (1998). ISO 7726/1998. *Thermal environments – instruments and methods for measuring physical quantities*. International Standardization Organization, Geneva, Suisse.

- International Organization for Standardization (2005). ISO 7730/2005. *Ambiances thermiques modérées – Détermination des indices PMV et PPD et spécification des conditions de confort thermique*. International Standardisation Organization, Geneva, Suisse.
- Jaglou, P. & Minard, D. (1957). Control of heart casualties at military training camps. *Am. A. Arch. Ind. Health*, 16, 302–316.
- Kang, Z.J., Xue H. & Bong T.Y. (2001). Modeling of thermal environment and human response in a crowded space for tropical climate. *Building and Environment*, 36, 511–525.
- Lamberts, R. (2002). *Conforto Térmico e Stress Térmico*. LabEEE Laboratório de Eficiência Energética em Edificações – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Leucz, J. (2001). *Ambiente de trabalho das salas de aula no ensino básico nas escolas de Curitiba*. Dissertação publicada. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Mackworth, N.H. (1946). Effects of heat on wireless telegraphy operators hearing and recording Morse messages. *British Journal of Industrial Medicine*, 3, 143–158.
- Martens, W.J.M. (1998). *Climate change, thermal stress and mortality changes*. Elsevier Science Ltd, Vol. 46, No. 3, 331–334.
- Martinet, C. & Meyer, J.P. (1999). *Travail à la chaleur et confort thermique*. Note Scientifique & Technique, NS 184, 61.
- McIntosh, D.H & Thon, A.S. (1981). *Essentials of Meteorology*. Taylor & Francis LTD, London, 5^o ed.
- Mikani, C. & Amorim, M. (2005). *Características de temperatura e conforto térmico em ambiente urbano e rural: episódios de Verão*. In actas da VI Semana de Geografia: A Geografia e os paradigmas do século XXI, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP- Presidente Prudente, Brasil.
- Nieuwolt, S. (1977). *Tropical climatology*. Wiley, London: Wiley.
- North, G.R. & Erukhimova, T. L. (2009). *Atmospheric Thermodynamics, Elementary Physics and Chemistry*. Cambridge University Press, New York.
- O'Neal, E.K. & Bishop, P. (2010). Effects of working a hot environment on repeated performances of multiple types of simple mental tasks. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 40(1), 77–81.
- Pereira, L.C.S. & Talaia, M.A.R. (2010). *Conforto e stress térmico numa indústria – Estudo exploratório*. Física 2010. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 205.

Conforto e desconforto térmico numa nave industrial – Estudo exploratório

Bibliografia

- Pereira, L.C.S. & Talaia, M.A.R. (2011a). *Strees térmico e detecção de zonas vulneráveis numa indústria – estudo exploratório*. 4º Congresso Nacional de Biomecânica. Sociedade Portuguesa de Biomecânica, Coimbra, 721–725.
- Pereira, L.C.S. & Talaia, M.A.R. (2011b). *A cor e as zonas de stress térmico numa escala comum exemplo numa industria metalomecânica*. Actas do 6º Congresso Luso - Moçambicano de Engenharia e 3º Congresso de Engenharia de Moçambique. Maputo, Moçambique, de 29 Agosto a 2 de Setembro (no prelo).
- Pereira, L.C.S., Talaia, M.A.R. & Simões, H. (2011). *Os índices PPD, PMV e EsConTer na avaliação de zonas vulneráveis de um local*. Actas do 6º Congresso Luso - Moçambicano de Engenharia e 3º Congresso de Engenharia de Moçambique. Maputo, Moçambique, de 29 Agosto a 2 de Setembro (no prelo).
- Rebelo, A., Baptista, T.S. & Diogo, M.T. (2008). *Caracterização das condições de conforto térmico da FEUP*. Actas do 5º Congresso Luso – Moçambicano de Engenharia e 2º Congresso de Engenharia de Moçambique, Maputo, 2–4 Setembro, artº 11A009, 14.
- Riniolo, T.C. & Schmidt L.A. (2006). Chronic heat stress and cognitive development: An example of thermal conditions influencing human development. *Developmental Review*, 26, 277-290.
- Rodrigues, F.A.G. (2007). *Conforto e Stress Térmico: uma Avaliação em Ambiente Laboral*. Dissertação publicada, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Seeley, R., Stephens, T.D. & Tate, P. (2001). *Anatomia & Fisiologia*. Lusodidacta, Lisboa.
- Talaia, M. (2010). *Termodinâmica da atmosfera, unidade curricular meteorológica física*. Departamento de Física, Universidade de Aveiro.
- Talaia, M., & Simões, H. (2009). *Alterações Climáticas e Bem-estar do Ser Humano*. Livro de resumos do 6º Simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG e 10º Encontro Luso-Espanhol de Meteorologia, Caparica, 16-18 (03), 55.
- Thom, E.C. (1959) The Discomfort Index. *Weatherwise*, 12 (1), 57-60.
- Tsonis, A. A. (2007). *An Introduction to Atmospheric Thermodynamics*. Cambridge University Press, Cambridge, 2º ed.
- U.S. Department of Energy, Thermodynamics (1992). Heat Transfer, and Fluid Flow. Doe Fundamentals Handbook, Vol. 2.
- W.M.O. (1987). *World Climate Program Applications, Climate and Human Health*. World Meteorological Organization.

Zhao, J., Zhu, N. & Lu, S. (2009). Productivity model in hot and humid environment based on heat tolerance time analysis. *Building and Environment*, 44, 2202–2207.

Anexos

Tabela 8— Tabela de Níveis de Roupa

| Tipos de Roupa | | Clo | m ² °C/W |
|--|---------------------------------|---------------|---------------------|
| Roupa íntima inferior | Meias | 0,02 | 0,003 |
| | Slip | 0,03 | 0,005 |
| | Peúgas pelos tornozelos | 0,04 | 0,006 |
| | Peúgas pelos tornozelos grossas | 0,06 | 0,009 |
| | Cuecas e ceroulas | 0,10 | 0,016 |
| | Ceroulas 1 / 2 perna lã | 0,06 | 0,009 |
| | Ceroulas de perna inteira | 0,10 | 0,016 |
| Roupa íntima superior | Sutiã | 0,01 | 0,002 |
| Camisas | Camisa sem mangas | 0,06 | 0,009 |
| | Camisa de manga curta | 0,09 | 0,014 |
| | Camisa de manga comprida | 0,12 | 0,019 |
| | Camisa térmica nylon | 0,14 | 0,022 |
| | Top | 0,06 | 0,009 |
| | Camisa manga curta | 0,09 | 0,029 |
| | Blusa ligeira, manga comprida | 0,15 | 0,023 |
| | Camisa ligeira, manga comprida | 0,20 | 0,031 |
| | Camisa normal, manga comprida | 0,25 | 0,039 |
| | Camisa flanela, manga comprida | 0,30 | 0,047 |
| | Blusa comprida de gola de cisne | 0,34 | 0,053 |
| | Calças | Calças curtas | 0,06 |
| Calças ligeiras | | 0,20 | 0,031 |
| Calças normais | | 0,25 | 0,039 |
| Calças de flanela | | 0,28 | 0,043 |
| Calças de treino | | 0,28 | 0,043 |
| Fato de macaco | Diário, com cinturão | 0,49 | 0,076 |
| | Trabalho | 0,50 | 0,078 |
| Fato de macaco de alto isolamento | Multicomponente, isolamento | 1,03 | 0,160 |
| | Com forro de peluche | 1,13 | 0,175 |
| | Colete | 0,12 | 0,019 |
| Sweater | Sweater fina | 0,20 | 0,031 |
| | Sweater fina pescoço de cisne | 0,26 | 0,040 |
| | Sweater normal | 0,28 | 0,043 |
| | Sweater grossa | 0,35 | 0,054 |
| | Sweater grossa pescoço de cisne | 0,37 | 0,057 |

(Continua)

Tabela 8 — Tabela de Níveis de Roupa (Continuada)

| Tipos de Roupa | | Clo | m ² °C/W |
|------------------------|--------------------------------------|------|---------------------|
| Jaqueta | De vestido | 0,13 | 0,020 |
| | Jaqueta ligeira de verão | 0,25 | 0,039 |
| | Jaqueta | 0,35 | 0,054 |
| | Anoraque | 0,30 | 0,047 |
| Abrigo | Abrigo | 0,60 | 0,093 |
| | Gabardina | 0,55 | 0,085 |
| | Parka | 0,70 | 0,109 |
| | Sobre abrigo multicomponente | 0,52 | 0,081 |
| Calçado | Pantufas | 0,02 | 0,003 |
| | Sapatos sola fina | 0,05 | 0,008 |
| | Sapatos sola grossa | 0,10 | 0,016 |
| | Botas | 0,03 | 0,005 |
| Saias, vestidos | Saia ligeira, 15 cm sobre o joelho | 0,04 | 0,006 |
| | Saia ligeira, 15 cm baixo do joelho | 0,10 | 0,016 |
| | Saia grossa pelo joelho | 0,05 | 0,008 |
| | Vestido ligeiro sem mangas | 0,10 | 0,016 |
| | Vestido de inverno manga larga | 0,18 | 0,028 |
| Roupa de cama | Camisa de noite larga de manga larga | 0,25 | 0,039 |
| | Camisa de noite pelo joelho | 0,25 | 0,039 |
| | Pijama de hospital | 0,40 | 0,062 |
| | Pijama de manga e calças largas | 0,30 | 0,047 |
| | Body de dormir com pés | 0,15 | 0,023 |
| | Bermudas | 0,31 | 0,048 |
| Batas | Bata larga acolchoada de manga larga | 0,50 | 0,078 |
| | Bata curta acolchoada de manga larga | 0,72 | 0,112 |
| Assentos | Acolchoado, com almofada | 0,53 | 0,082 |
| | Poltrona | 0,41 | 0,064 |

Conforto e desconforto térmico numa nave industrial – Estudo exploratório

Anexos

Tabela 9— Tabela de Níveis Metabólico

| Níveis Metabólicos (<i>M</i>) das seguintes actividades | W/m² | Met |
|---|------------------------|------------|
| Encostado | 46 | 0,8 |
| Sentado relaxado | 58 | 1,0 |
| Trabalho de relojoeiro | 65 | 1,1 |
| De pé, relaxado | 70 | 1,2 |
| Actividade sedentária: oficina, vivenda, escola. | 70 | 1,2 |
| Condução de automóveis | 80 | 1,4 |
| Profissão gráfica, encadernador | 85 | 1,5 |
| De pé, actividade ligeira: Compras, indústria ligeira. | 93 | 1,6 |
| Professor | 95 | 1,6 |
| Trabalho doméstico: barbear, lavar-se, vestir-se | 100 | 1,7 |
| Caminhar horizontalmente a 2 km/h | 110 | 1,9 |
| De pé, actividade média: vendedor, trabalho doméstico. | 116 | 2,0 |
| Construção, colocando blocos de 15 kg | 125 | 2,2 |
| De pé, a lavar pratos | 145 | 2,5 |
| Trabalho doméstico: varrer o chão | 170 | 2,9 |
| Trabalho doméstico: lavar a mão e engomar (120 – 220 W/m ²) | 170 | 2,9 |
| Construção: operar um compactador de solo pneumático | 175 | 3,0 |
| Construção: cofragem | 180 | 3,1 |
| Caminhar horizontalmente a 5 km/h | 200 | 3,4 |
| Florestal: cortar árvores com uma serra metálica | 205 | 3,5 |
| Agricultura: aração com animais | 235 | 4,0 |
| Construção: descarregar um camião carregado de pedras | 275 | 4,7 |
| Desporto: patinar sobre gelo a 18 km/h | 360 | 6,2 |
| Agricultura: cavar com uma pá (24 golpes/minuto) | 380 | 6,5 |
| Desporto: esqui horizontalmente a 9 km/h | 405 | 7,0 |
| Florestal: trabalhar com um machado de 2 kg (33 golpes/minuto) | 500 | 8,6 |
| Desporto: correr a 15 km/h | 550 | 9,5 |