



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Avaliação da performance de termómetros de globo

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

Autor

Alexandre Malho Rodrigues Amado

Orientadores

Professor Doutor Divo Augusto Alegria Quintela

Professor Avelino Virgílio Fernandes Monteiro de Oliveira

Júri

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

Vogal Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Julho, 2014

“No que diz respeito ao empenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação,
não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem-feita ou não faz.”

Ayrton Senna

Agradecimentos

O presente trabalho não teria sido possível sem a colaboração e apoio de várias pessoas, às quais quero transmitir as minhas palavras de apreço e gratidão.

Aos coordenadores Professor Doutor Divo Augusto Alegria Quintela e Professor Avelino Virgílio Fernandes Monteiro de Oliveira pela disponibilidade, orientação e ajuda nos ensaios laboratoriais e no tratamento de dados.

Aos Engenheiros Vítor Ferreira e Mário Santos por toda a disponibilidade para ajuda e esclarecimento de dúvidas.

Aos meus colegas de curso, que sempre demonstraram um enorme espírito de entajuda e companheirismo ao longo destes anos.

À minha família que sempre me encorajou e ajudou, principalmente aos meus avós.

Pai e Mãe, obrigado por toda a paciência e esforço ao longo destes anos e a ti Patrícia, obrigado pelo carinho e apoio incondicionais.

Resumo

O stresse térmico é um problema comum a nível industrial. Qualquer avaliação ao nível do stresse térmico requer uma avaliação de diferentes condições climáticas, especialmente da humidade, temperatura e velocidade do ar e a temperatura média radiante.

O índice *WBGT* (“Wet Bulb Globe Temperature”) é um dos mais utilizados na medição do stresse térmico, pois é um índice de cálculo rápido e útil em ambientes quentes, permitindo assim saber quando actuar e proteger os trabalhadores.

A temperatura de globo negro, a temperatura do ar e a temperatura de bolbo húmido natural, constituem as grandezas que permitem obter o índice *WBGT*. Os aparelhos de medição diferem na forma e no tamanho, de modelo para modelo, o que pode levar a que alguns aparelhos não cumpram as especificações do projecto e forneçam dados incorrectos nas medições.

O sensor de globo negro é a componente deste sistema de medida sobre o qual vai incidir este estudo, sendo que os sensores de globo podem variar entre os 24mm e os 150mm, mas apenas estes últimos respeitam a norma internacional ISO 7243.

Com esta dissertação pretende-se esclarecer se quando calculado o stresse térmico, vão existir diferenças entre os vários sensores de globo, abordando os seus diferentes tamanhos e *designs* através de ensaios experimentais com os equipamentos disponíveis e ver de que forma são afectados os resultados obtidos, assim como desenvolver uma equação empírica que faça a correspondência entre as temperaturas medidas por diferentes globos e o globo padrão.

Verificou-se que as temperaturas obtidas pelos globos de 150mm são superiores aos valores obtidos pelo globo de 50mm e dessa forma a utilização de equipamentos inferiores ao *standard* (150mm) não são eficazes na avaliação do índice *WBGT*, a não ser que o próprio equipamento faça a calibração automática para os valores padrão e aceites pela norma.

Palavras-chave: Termómetro de globo negro, stresse térmico, índice *WBGT*.

Abstract

The thermal stress is a common problem at industrial level. Any evaluation of the level of heat stress requires an assessment of different climatic conditions, especially of humidity, temperature and air velocity.

The *WBGT* index (Wet Bulb Globe Temperature) is the most widely used at present in the measurement of thermal stress, because it is an index of rapid calculation and useful in hot environments and thus know when act and protect workers.

The black globe temperature, the air temperature and the natural wet bulb temperature are the quantities that can be used to obtain the *WBGT* index. The measurement apparatus differ in shape and size from model to model, which can lead to some devices do not meet the specifications of the project and provide incorrect data of measurements.

The black globe temperature is the component of this measurement system on which will focus this study, being that the sensors of globe can vary between 10mm and 150mm but only the latter complies with the international standard ISO 7243.

With this dissertation seeks to clarify that when calculated the heat stress, there are differences between the various sensors of globe addressing their different sizes and designs, seeing how they are affected the results obtained as well as develop an empirical equation to make the correspondence between the temperatures measured by different globes and the standard globe.

It was found that the temperatures obtained by globes of 150mm are higher than the values obtained by globe 50mm and thus the use of equipment below the standard (150mm) are not effective in the evaluation of *WBGT* index, unless the equipment itself make the automatic calibration for the default values and accepted by the standard.

Keywords Black globe thermometer, heat stress, *WBGT* index

Índice

Índice de Figuras	x
Índice de Tabelas.....	xii
Simbologia e Siglas.....	xiv
Simbologia.....	xiv
Siglas.....	xv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. O Homem e o Ambiente Térmico.....	1
1.2. História e Limitações do Índice WBGT	5
1.3. Objectivos.....	6
2. Caracterização de Ambientes Térmicos	7
2.1. Parâmetros Físicos e Individuais.....	7
2.2. Método de Determinação do Índice WBGT.	12
2.3. Equipamentos de Medida	19
3. Desenvolvimentos Experimentais.....	20
3.1. Instalação Experimental	20
3.2. Determinação das Velocidades de Escoamento.....	24
3.3. Condições Ambientais	28
3.4. Apresentação e Discussão de Resultados.....	31
3.5. Análise Global.....	42
3.5.1. Condições Térmicas	42
3.5.2. Tempo de Resposta	43
3.5.3. Diferença de Temperatura entre os Globos de 150 e 50mm	45
3.5.4. Efeito da Velocidade	48
4. Conclusões	54
Referências Bibliográficas.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Processos combinados de transmissão de calor	2
Figura 2.1. Exemplos de anemómetros (http://www.logismarket.pt)	11
Figura 2.2. Exemplo de Higrómetro e Psicrómetro (www.instrutemp.com)	11
Figura 2.3. Exemplo de globo negro <i>standard</i> (www.scientificgear.com)	17
Figura 2.4. Exemplo de montagem do monitor e sensor de stress térmico	17
Figura 3.1. Instalação Experimental	20
Figura 3.2. Monitor e sensor de stress térmico WBGT da Brüel & Kjaer	21
Figura 3.3. Monitor Testo 400 e globo negro da Testo de 150mm.....	21
Figura 3.4. Data Logger 175-T2 da Testo e globo negro de 50mm.....	22
Figura 3.5. Data Logger 175- H2 da Testo.....	22
Figura 3.6. Representação esquemática dos ensaios.....	23
Figura 3.7. Ilustração dos 12 pontos à saída do ventilador.....	24
Figura 3.8. Potenciómetro	25
Figura 3.9. Ventilador Sodeca	25
Figura 3.10. Caixa do ventilador com dois filtros metálicos.....	25
Figura 3.11. Medições com o anemómetro	27
Figura 3.12. Representação gráfica da evolução das temperaturas de globo negro da Testo, globo negro da Brüel & Kjaer e globo negro de 50mm (ensaio 1)	32
Figura 3.13. Representação gráfica da evolução das temperaturas de globo negro da Testo, globo negro da Brüel & Kjaer e globo negro de 50mm (ensaio 2)	34
Figura 3.14. Representação gráfica da evolução das temperaturas de globo negro da Testo, globo negro da Brüel & Kjaer e globo negro de 50mm (ensaio 3)	36
Figura 3.15. Representação gráfica da evolução das temperaturas de globo negro da Testo, globo negro da Brüel & Kjaer e globo negro de 50mm (ensaio 4)	38
Figura 3.16. Representação gráfica da evolução das temperaturas de globo negro da Testo, globo negro da Brüel & Kjaer e globo negro de 50mm (ensaio 5)	40
Figura 3.17. Representação gráfica da diferença de temperaturas (tg150 da Bruel - tg 50).....	45
Figura 3.18. Representação gráfica da diferença de temperaturas (tg150 da Testo - tg 50)..	46
Figura 3.19. Representação gráfica da influência da velocidade do ar na diferença de temperaturas (tg150 da Bruel-tg50)	48

Figura 3.20. Representação gráfica da influência da velocidade do ar na diferença de temperaturas (tg150 da Testo-tg50)	49
Figura 3.21. Representação gráfica e equação de conversão de Tg150 em Tg50 em convecção natural.....	51
Figura 3.22. Representação gráfica e equação de conversão de Tg150 em Tg50 em convecção forçada	52

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Valores máximos recomendados do índice WBGT (ISO 7243)	13
Tabela 2.2. Alturas normalizadas para a colocação dos sensores (ISO 7726)	18
Tabela 2.3. Características dos equipamentos de medida.....	19
Tabela 3.1. Média e desvio padrão das velocidades nas doze posições com dois filtros no ventilador	26
Tabela 3.2. Velocidades obtidas.....	27
Tabela 3.3. Tabela dos Valores da Temperatura ambiente durante os ensaios com o globo de 150mm da Testo	28
Tabela 3.4. Tabela dos Valores da Temperatura ambiente durante os ensaios com o globo de 150mm da Brüel & Kjaer.....	29
Tabela 3.5. Tabela dos Valores da Temperatura ambiente durante os ensaios com o globo de 50mm.....	30
Tabela 3.6. Descrição dos diversos ensaios.....	31
Tabela 3.7. Minuto inicial do período estável e temperaturas médias desse respectivo período (ensaio 1)	33
Tabela 3.8. Tempo necessário para se atingir a temperatura final e 90% desse valor (ensaio 1).....	33
Tabela 3.9. Minuto inicial do período estável e temperaturas médias desse respectivo período (ensaio 2)	35
Tabela 3.10. Tempo necessário para se atingir a temperatura final e 90% desse valor (ensaio 2).....	35
Tabela 3.11. Minuto inicial do período estável e temperaturas médias desse respectivo período (ensaio 3)	37
Tabela 3.12. Tempo necessário para se atingir a temperatura final e 90% desse valor (ensaio 3).....	37
Tabela 3.13. Minuto inicial do período estável e temperaturas médias desse respectivo período (ensaio 4)	39
Tabela 3.14. Tempo necessário para se atingir a temperatura final e 90% desse valor (ensaio 4).....	39
Tabela 3.15. Minuto inicial do período estável e temperaturas médias desse respectivo período (ensaio 5)	41
Tabela 3.16. Tempo necessário para se atingir a temperatura final e 90% desse valor (ensaio 5).....	41
Tabela 3.17. Condições térmicas dos ensaios	42

Tabela 3.18. Tempo de resposta dos sensores	44
Tabela 3.19. Diferenças de Temperaturas	47
Tabela 3.20. Diferenças de temperaturas – Efeito da velocidade	50
Tabela 3.21. Equações de conversão em convecção natural	51

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

Símbolo	Significado	Unidades
D	Diâmetro do globo	[mm]
h_{cg}	Coefficiente de transmissão de calor por convecção ao nível do globo	[W/m ² K]
HR	Humidade relativa	[%]
I_{clo}	Isolamento térmico do vestuário	[clo]
q_c	Trocas de calor por convecção entre o ar e o globo	[W/m ²]
q_r	Trocas de calor por radiação entre as superfícies envolventes e o globo	[W/m ²]
T_{bhn}	Temperatura de bolbo húmido natural	[°C]
T_d	Temperatura de orvalho	[°C]
T_g	Temperatura de globo	[°C]
\bar{T}_r	Temperatura média radiante	[°C]
v_a	Velocidade do ar	[m/s]
ΔT	Variação de temperatura	[°C]
ε_g	Emissividade do globo negro	[adm]
Σ	Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8}$)	[Wm ⁻² K ⁻⁴]

Siglas

<i>WBGT</i>	Wet Bulb Globe Temperature
<i>ISO</i>	International Organization for Standardization
<i>Dem</i>	Departamento de Engenharia Mecânica
<i>FCTUC</i>	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
<i>ASHRAE</i>	American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers

1. INTRODUÇÃO

1.1. O Homem e o Ambiente Térmico

O ambiente térmico que nos rodeia apresenta características de extrema importância para as condições de trabalho e qualidade de vida, podendo ser definido como o conjunto das variáveis térmicas que afetam o organismo do homem, intervindo de forma directa ou indirecta na sua saúde e bem-estar, assim como na realização das tarefas que lhe são atribuídas, interferindo deste modo no rendimento de trabalho.

O Homem pertence ao grupo dos animais homeotérmicos, que para sobreviver necessita de manter a temperatura interna do corpo (cérebro, coração e órgãos do abdómen) dentro de limites muito estreitos, ou seja, a uma temperatura próxima dos $37,0^{\circ}\text{C} \pm 0,8^{\circ}\text{C}$, obrigando assim a uma procura constante de equilíbrio térmico entre o Homem e o meio envolvente que afeta essa temperatura interna, podendo um pequeno desvio em relação a esse valor desencadear consequências graves. Em termos de sobrevivência, em caso de doença, 32°C é o limite inferior e 42°C o limite superior.

Quando existe a percepção psicológica desse equilíbrio, pode-se falar em conforto térmico, que é definido pela ISO 7730 como “*um estado de espirito que expressa satisfação com o ambiente térmico*”. Desse modo, para obter uma avaliação homem-meio ambiente detalhada, é necessário considerar os parâmetros físicos que intervêm na troca de calor entre o corpo humano e o ambiente (interior ou exterior) (Fanger 1972, Mayer e Höpfe 1987, Höpfe 1993, Jendritzky 1993, Mayer 1993, VDI 1998).

A temperatura do corpo humano é mantida perto dos 37°C , sendo o principal mecanismo de ganho de calor interno, o calor gerado pelos músculos (taxa metabólica) com 20% de eficiência aproximadamente (Parsons 2003)

Quando dois corpos estão na presença um do outro em temperaturas diferentes, há transferência de calor do corpo mais quente para o corpo mais frio, até que se estabeleça a igualdade de temperaturas. Essa transferência de calor, pode ser transmitida do, ou para o corpo, através de: convecção, condução e radiação.

Na Figura 1.1 podemos ver um exemplo das trocas de calor que ocorrem de ou para o corpo.

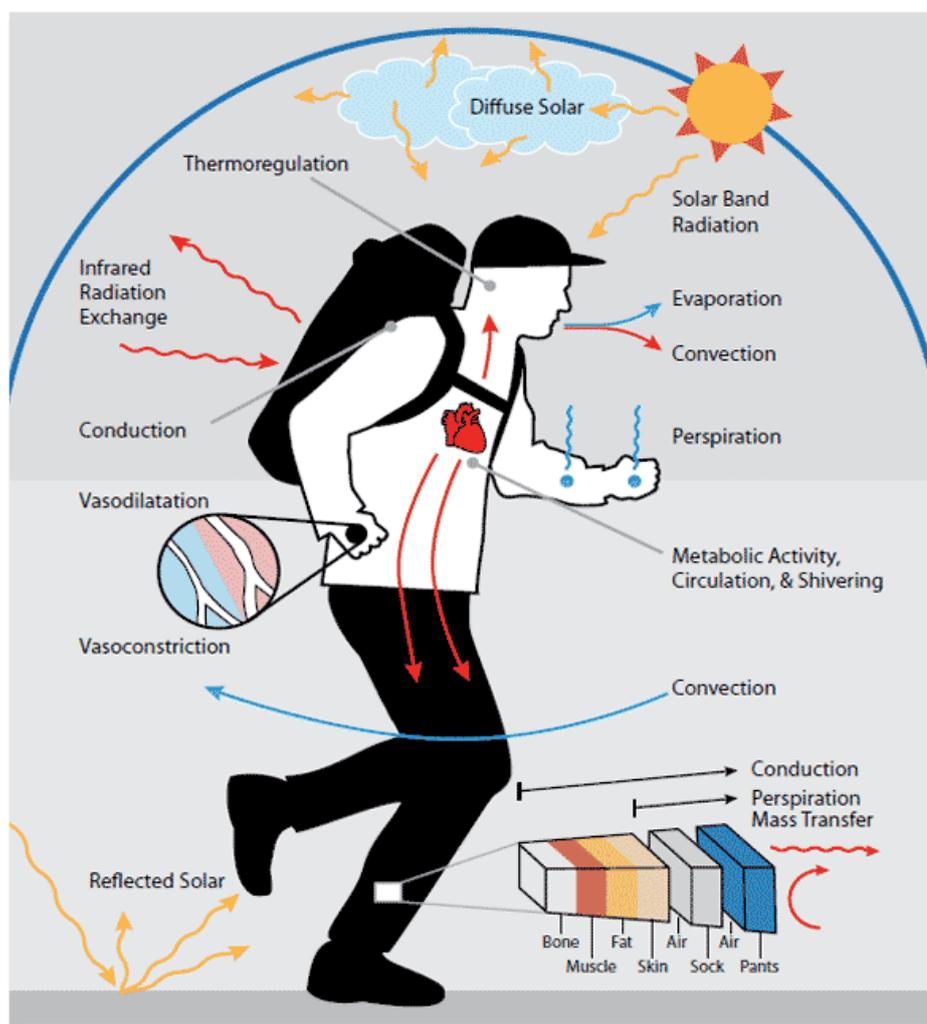


Figura 1.1. Processos combinados de transmissão de calor
 (Human thermoregulatory system (Thermo-Analytics) adaptado de Gourel (2011))

Do ponto de vista de conforto térmico, a transferência de calor por condução desempenha um papel geralmente não muito significativo. Pelo contrário, as trocas convectivas são mais importantes. Os fluxos convectivos de calor sensível e calor latente são influenciados pela temperatura e humidade do ar respetivamente, sendo ambas afetadas pela velocidade do vento. O ambiente radiante tem também um efeito importante no equilíbrio do calor do corpo, onde a radiação solar directa é o parâmetro mais significativo no ganho de calor.

A importância relativa dos fluxos terrestres e solares que atingem o corpo humano de diferentes direcções e relacionados com a temperatura média radiante dependem da época do ano, altura do dia e localização, assim como a posição e orientação do corpo,

sendo que, também a postura do corpo é importante, pois a temperatura para uma pessoa de pé é diferente de uma que esteja sentada (Jendritzky 1993, VDI 1998, Ali-Toudert 2005).

Os fatores ambientais que influenciam estes mecanismos de transferência de calor e consequentemente o stresse térmico, a que uma pessoa está sujeita devido ao calor são: a temperatura do ar, a velocidade do vento, a humidade e as fontes de radiação.

O stresse térmico depende também do vestuário e do metabolismo (Parsons 2003).

A exposição ao calor aumenta a temperatura do corpo humano. Alguns aumentos acima de 37°C são aceitáveis, mas um aumento acima dos 39°C cria riscos para a saúde, que variam de pessoa para pessoa, consoante o grupo étnico, a idade, o género e a duração do tempo de exposição e do grau de climatização (Parsons 2003).

Em trabalhos leves ou ambientes frios é libertado calor metabólico para o ambiente por radiação e convecção através da pele. Mas em trabalhos mais árduos e ambientes mais quentes, o corpo humano torna-se dependente da transpiração, aumentando assim a vulnerabilidade a alguma coisa que restrinja a evaporação, ou seja, o vestuário, a humidade elevada ou o baixo movimento de ar. Se não for restringida a evaporação do suor, deixa as pessoas lidarem (sem desconforto) com temperaturas de 100°C em saunas e 50°C nos desertos.

Mas quando a evaporação é restringida de forma a não se dissipar, as cargas de calor ambientais e metabólicas armazenadas, são acumuladas no corpo. Aumenta a sua temperatura e a tensão cardiovascular, o suor adicional é encoberto e acelera a desidratação, aproximando-se assim o corpo humano do limite em relação à tolerância ao calor. Com a circulação sobrecarregada pelo stresse, combinado pelo calor, exercício, postura erecta e possivelmente a desidratação, as pessoas sentem-se fracas e podem sucumbir à exaustão devido ao calor, ou ter mesmo um ataque cardíaco.

Normalmente as pessoas evitam esses efeitos adversos através da resposta comportamental. Sempre que a evaporação é restringida o suor que não evapora, molha a roupa e a pele causando desconforto, de modo a que seja feito algo para melhorar a evaporação, como por exemplo tirar alguma roupa ou procurando uma corrente de ar. Também se podem reduzir as cargas de calor ambientais e metabólicas indo para uma sombra, ou trabalhando a um ritmo confortável fazendo pausas para recuperar a temperatura sempre que necessário.

Tudo isto é feito automaticamente, mantendo-se desse modo um balanço entre o trabalho a realizar e a capacidade de lidar com ele. Assim, a resposta do corpo protege-o dos ambientes mais ameaçadores, mesmo que a tolerância ao calor seja baixa, e se funcionar normalmente, fornece uma sensível e poderosa defesa contra efeitos adversos (Budd 2001).

As mudanças geográficas devido a motivos pessoais ou profissionais podem ser especificadas por um padrão de exposição ao calor, que pode variar de país para país. Esses padrões traduzem-se no índice *WBGT* em função do risco de saúde para a população, sendo que o padrão de stresse térmico é diferente em países mais frescos (ex. Inglaterra) do que em países mais quentes (ex. Índia), onde a população é mais adaptada a altas temperaturas (Parsons 2006).

O índice *WBGT* é um índice de stresse térmico bem estabelecido em locais de trabalho, com ciclos recomendados de trabalho-descanso para diferentes taxas metabólicas, especificadas de acordo com o padrão internacional, sendo actualmente o índice de stresse térmico mais utilizado (ISO 7243, 1989).

O padrão internacional para o stresse térmico utiliza o índice *WBGT*, que pode ser traduzido como índice de temperatura de bolbo húmido e de temperatura de globo, para recomendar os limites de trabalho-descanso, em locais de trabalho de ambientes quentes (ISO 7243 1989), de modo a assegurar que a temperatura do corpo humano não excede os 38°C. Muitos países têm os padrões nacionais baseados neste padrão internacional para os valores limite do *WBGT* (ILO 2001).

1.2. História e Limitações do Índice WBGT

O índice *WBGT* foi inventado há mais de 50 anos sendo actualmente um índice de stress térmico muito utilizado a nível mundial. Contudo, com o passar dos anos, a sua história e as suas limitações parecem ter sido esquecidas.

O índice *WBGT* foi inventado e usado inicialmente durante os anos 50, por Yaglou e Minard, como um elemento de sucesso numa iniciativa de como controlar um surto de doenças, provocadas pelo calor nos campos de treino do exército e marinha americana.

As medições de controlo, baseadas na temperatura e humidade do ar e aplicadas a todos os soldados de igual forma, provaram ser eficazes, mas envolveu elevados custos ao nível do tempo de treino perdido. Novas medidas de controlo introduzidas em 1956, reduziram ainda mais esse surto de doenças, permitindo assim perder menos tempo de treino. Estas inovações cruciais, consistiam em substituir as medições de temperatura e humidade, pelo *WBGT* (ACSM 1984), que responde adicionalmente ao sol e ao vento (ACSM 1987), com a finalidade de identificar níveis perigosos de *WBGT* e soldados vulneráveis (Sports Medicine Austrália 2006), protegendo-os, deste modo, com a suspensão do exercício para níveis altos de *WBGT* e melhorando a tolerância do pelotão ao calor, em condições especiais.

Como em todos os índices que integram elementos de ambientes térmicos, a interpretação dos níveis de *WBGT* observados requer uma avaliação precisa da actividade das pessoas, do vestuário entre outros fatores, em que todos eles podem introduzir grandes erros na previsão de efeitos adversos. Além disso a exatidão do *WBGT* está a ser afectada por erros de medida associados à omissão da temperatura de globo, com instrumentos não *standard* e procedimentos de calibração insatisfatória.

1.3. Objectivos

Actualmente existem vários equipamentos de medida de temperatura de globo negro, distintos na forma e no tamanho, de um fabricante para o outro, sendo que o mais popular é o termómetro de globo negro, devido ao seu baixo custo e elevada gama de temperaturas abrangidas. Tem como aspectos negativos o facto de ter um elevado tempo de resposta, entre 20 a 30 minutos, e a sua forma esférica, o que torna as temperaturas obtidas mais elevadas.

Os globos podem variar entre 10mm e 150mm de diâmetro, sendo a temperatura de globo obtida através de sensores que se encontram no interior destes. A norma internacional ISO 7243:1989 (Ambientes quentes – Estimativa de stresse térmico num trabalhador, baseado no índice *WBGT*) dá uma orientação clara de como o sensor de globo negro deve ser construído, pois um aspecto também importante é a forma de posicionamento do monitor de stresse térmico e do próprio termómetro de globo, se são ou não colocados correctamente no ambiente a ser medido.

Este trabalho vai abordar os diferentes tamanhos e *designs* de globos, que medem a temperatura radiante.

Como o globo de 150mm de diâmetro é considerado o globo *standard*, vamos procurar obter uma equação empírica de correcção, através de avaliações experimentais com os termómetros de globo disponíveis, tentando encontrar uma relação entre o globo de 150mm e os mais pequenos.

2. CARACTERIZAÇÃO DE AMBIENTES TÉRMICOS

2.1. Parâmetros Físicos e Individuais

Frio ou calor em excesso, mudança de um ambiente quente para um ambiente frio ou vice-versa, são prejudiciais à saúde.

Em ambiente industriais é frequente a ocorrência de situações de stresse térmico, nomeadamente devido a um calor excessivo. Nestas situações, a concentração e a capacidade física dos trabalhadores é afectada, o que naturalmente irá comprometer a produtividade da empresa e, não menos importante, irá criar condições favoráveis à ocorrência de acidentes de trabalho.

Existem 6 variáveis principais que influenciam a sensação térmica de uma pessoa exposta a um ambiente térmico particular (interior ou exterior), sendo duas subjetivas e quatro físicas.

Subjectivas

- Isolamento térmico do vestuário
- Taxa metabólica

Físicas

- Temperatura do ar
- Temperatura média radiante
- Velocidade do ar
- Humidade relativa

Medindo ou estimando estes parâmetros podemos calcular, dependendo da situação, o índice de conforto, ou de stresse de modo a ter uma avaliação do ambiente térmico.

Isolamento térmico do vestuário

O isolamento térmico do vestuário tem um impacto substancial no seu conforto térmico. Apesar de o papel principal do vestuário ser proteger do frio, também existe para proteger do calor como no caso de trabalhadores metalúrgicos e bombeiros. Relativamente ao conforto térmico apenas o primeiro caso é considerado.

A sua unidade é o *Clo* ou em $K \cdot m^2_{\text{de pele}}/W$ onde $1 \text{ Clo} = 0,155 \text{ K} \cdot m^2/W$. Esta é a quantidade de isolamento que permite a uma pessoa em repouso manter o equilíbrio térmico num ambiente a $21^{\circ}C$ ($70^{\circ}F$) numa sala ventilada ($0,1 \text{ m/s}$). Acima dessa temperatura uma pessoa assim vestida vai transpirar, enquanto abaixo dessa temperatura a pessoa vai sentir frio.

Existem vários métodos para determinar o isolamento térmico do vestuário, mas o mais correto, de acordo com a ASHRAE, é através de medições realizadas em manequins aquecidos e em sujeitos ativos.

Como o isolamento térmico não pode ser medido em aplicações de engenharia de rotina existem tabelas de valores medidos para vários conjuntos de roupas que podem ser usados.

Taxa metabólica

A taxa metabólica está relacionada com o nível de exercício e com o metabolismo de cada pessoa, sendo que, qualquer movimento corporal produzido pelos músculos que resulte num gasto energético, maior que os níveis de repouso, afeta a taxa metabólica.

Pode ser medido em met ($1 \text{ met} = 58,15 \text{ W}/m^2_{\text{de pele}}$), e normalmente uma pessoa apresenta uma taxa metabólica entre os 0,8 e os 4 met, podendo em situações extremas ultrapassar esses valores.

Temperatura do ar

A sua unidade é graus celsius ($^{\circ}\text{C}$) ou graus Fahrenheit (F), sendo medida com termómetros de dilatação de líquidos, termopares, termístores ou termómetros de resistência.

A temperatura do ar deve ser tomada em consideração na determinação da transferência de calor por convecção ao nível da pessoa. A medição desta quantidade, embora muitas vezes considerada simples, pode de facto levar a erros consideráveis se algumas precauções não forem tomadas, como por exemplo a redução do efeito da radiação e a inércia térmica do sensor (ISO 7726).

Um termómetro indica a temperatura a que se encontra o seu sensor. Esta temperatura pode ser diferente da temperatura do ar, a qual se pretende determinar. É também essencial assegurar que o ar ao atingir o termómetro, se encontra à mesma temperatura do ar cuja temperatura se pretende determinar. O ar pode ser aquecido por contacto imediatamente antes de atingir o termómetro, obtendo-se então uma leitura errada.

Para darem uma indicação correcta da temperatura do ar, os termómetros devem estar protegidos da radiação solar e celeste e de quaisquer objetos circunstantes. Ao mesmo tempo, devem ser convenientemente ventilados a fim de indicarem a temperatura do ar livre.

Temperatura média radiante

É o parâmetro mais influente para o conforto ao ar livre, principalmente em dias de sol, pois resume todos os fluxos da radiação que alcançam o corpo humano e pode ser muito complexo.

De acordo com a norma ISO 7726, “*É a temperatura de um espaço fechado uniforme imaginário onde a transferência de calor radiante a partir do corpo humano é igual à transferência de calor radiante do espaço não uniforme fechado actual*”

O termo \bar{T}_r foi introduzido a fim de parametrizar os efeitos do ambiente radiante complexo num índice de temperatura-dimensão e, para os investigadores de conforto térmico assim como planeadores urbanos, são necessárias formas fáceis e metódicas de avaliar.

No seu cálculo, as dimensões das superfícies que rodeiam, incluindo a secção visível do céu têm de ser determinadas. Todas as propriedades revelantes do ponto de vista da radiação térmica (ex. emissividade e albedo) devem ser conhecidas.

As metodologias usadas na avaliação da \bar{T}_r em condições interiores (ISO 7726), não são matérias fáceis e são ligeiramente diferentes das usadas ao ar livre devido à contribuição da luz solar.

A variável \bar{T}_r pode ser medida por aparelhos que permitam à radiação heterogénea total das paredes do espaço fechado em estudo, serem “integradas” num valor médio.

Um dos equipamentos mais utilizado neste cálculo e que vai ser estudado neste trabalho é o termómetro de globo negro.

Velocidade do ar

A velocidade do ar é um fluxo de gases e na terra este corresponde ao deslocamento do ar, que migra de regiões de alta pressão atmosférica para pontos onde a pressão é inferior. É geralmente expresso de acordo com a sua intensidade e direcção.

A velocidade do ar é medida através de aparelhos chamados anemómetros, existindo diversos tipos no mercado, na Figura 2.1 podemos ver três exemplos.

O calor ganho pelo globo da radiação é essencialmente perdido por convecção, pois um aumento da velocidade do ar, aumenta as suas perdas de calor. Se não houver vento, a temperatura aumenta devido ao globo estar estacionário ao sol, contudo raramente as

peças se mantêm quietas enquanto trabalham. Assim o movimento do corpo gera um fluxo de ar sobre a pele, logo a velocidade do vento na pele nunca é 0.



Figura 2.1. Exemplos de anemómetros (<http://www.logismarket.pt>)

Humidade relativa

A humidade relativa é definida pela quantidade de vapor de água contido no ar relativamente ao vapor máximo que ele poderia conter a uma determinada temperatura. Exprime-se em percentagem e está relacionada com a pressão parcial do vapor de água saturado.

A humidade relativa é mencionada frequentemente na previsão do tempo, e é um indicador da possibilidade de precipitação (chuva, neve, entre outros), orvalho ou nevoeiro.

A alta humidade durante os dias quentes faz a sensação térmica aumentar, ou seja, a pessoa tem a impressão que está muito calor, devido à redução da eficácia da transpiração da pele, e assim reduz o arrefecimento corporal. Por outro lado a baixa humidade nos desertos por exemplo, causa uma diferença grande de temperatura entre o dia e a noite.

Atualmente existem no mercado equipamentos de medida que facilmente calculam esta variável, como por exemplo o higrómetro e o psicrómetro presentes na Figura 2.2.



Figura 2.2. Exemplo de Higrómetro e Psicrómetro (www.instrutemp.com)

2.2. Método de Determinação do Índice WBGT.

O índice *WBGT* pode ser avaliado medindo a Temperatura de globo (T_g), a temperatura de bolbo húmido natural (T_{bhn}) e a temperatura do ar (T_a), em ambientes exteriores expostos à radiação solar, mas no caso de a avaliação ser realizada em ambientes não expostos à radiação solar, apenas se usam os dois primeiros parâmetros.

Para ambientes não expostos à radiação solar (interiores ou exteriores) a equação para calcular o *WBGT* é a seguinte:

$$WBGT = 0,7 \times T_{bhn} + 0,3 T_g \quad (1)$$

em que:

T_{bhn} – Temperatura de bolbo húmido natural [°C]

T_g – Temperatura de globo [°C]

Para ambientes expostos à radiação solar (exteriores) tem-se:

$$WBGT = 0,7 \times T_{bhn} + 0,2 \times T_g + 0,1 \times T_a \quad (2)$$

em que:

T_a – Temperatura do ar [°C]

Conhecido este índice podemos consultar os valores de referência que se encontram tabelados, de forma a estabelecer os níveis de stresse térmico presentes no local da medição e, posteriormente, em caso de níveis não recomendados, encontrar soluções para a melhoria deste stresse térmico.

Na Tabela 2.1 apresentam-se os valores recomendados para situações em que a pessoa está vestida normalmente (isolamento térmico do vestuário $I_{clo} = 0,6$ clo), fisicamente apta para a atividade que desenvolve e de boa saúde.

Tabela 2.1. Valores máximos recomendados do índice WBGT (ISO 7243)

Grau de taxa metabólica	Valores de referência do valor do índice WBGT			
	Trabalhador aclimatizado		Trabalhador não aclimatizado	
	[°C]		[°C]	
0 (descanso)	33		32	
1	30		29	
2	28		26	
	Ar Parado	Corrente de ar	Ar parado	Corrente de ar
3	25	26	22	23
4	23	25	18	20

No capítulo anterior foi apresentada a definição de Temperatura do ar (T_a), expondo-se nos parágrafos seguintes o significado dos restantes parâmetros físicos intervenientes na determinação do *WBGT*.

Temperatura de bolbo húmido natural

A temperatura é medida por um sensor coberto por uma mecha de algodão humedecido com água destilada, e exposto a um ambiente natural de sol e vento. É a combinação da temperatura e humidade do ar mas influenciada pelo calor da radiação e velocidade do vento.

A temperatura do algodão do sensor é inferior à temperatura do ar, logo a água aí presente evapora, e quanto maior for esta diferença de temperaturas entre o ar e o algodão, maior será o potencial de dissipação de calor por evaporação.

As leituras da T_{bhn} foram a fonte de algumas inconformidades no passado, devido à utilização errada dos instrumentos, sendo os erros mais comuns o algodão ficar seco, ou o posicionamento da haste do termómetro no reservatório de água, o que conduzia a leituras

erradas, pois isso iria aumentar o valor do índice e dessa forma poderíamos estar numa situação de perigo sem o saber.

Temperatura de globo

Este termómetro consiste num globo oco de cobre pintado de negro com uma espessura aproximadamente de 4 mm, que tem no seu interior um sensor de temperatura que pode ser, um bolbo de um termómetro de mercúrio, um sensor termoeléctrico ou uma sonda de resistência.

Contribui em 20 ou 30% para o índice *WBGT*. Enquanto a T_{bhn} é a maior componente (70%) a T_g pode ser até três vezes maior que a T_{bhn} de modo a equilibrar ambos os componentes para terem a mesma influência no *WBGT*.

Um medidor original de *WBGT* com um globo de 150mm de diâmetro, requer aproximadamente 20 minutos para atingir o equilíbrio para diferentes velocidades de ar. Os globos menores, de diâmetro exterior de 20 a 100mm, foram desenvolvidos para encurtar o tempo até atingir o equilíbrio, mas em contrapartida, devido à menor área de contacto, maiores serão as influências da temperatura e velocidade do ar.

A temperatura obtida através do globo negro resulta de um balanço térmico entre o globo e o ar envolvente por convecção, e o globo e as superfícies envolventes por radiação, sendo que estas se anulam em regime permanente, podendo este balanço térmico das trocas de calor entre globo e o ambiente ser traduzidos pelas seguintes expressões de acordo com a norma ISO 7726:

$$q_c + q_r = 0 \quad (3)$$

em que:

q_c – trocas de calor por convecção entre o ar e o globo [W/m^2];

q_r – trocas de calor com radiação entre as superfícies envolventes e o globo [W/m^2].

As trocas de calor por convecção entre o ar e o globo têm a seguinte expressão:

$$q_c = h_{cg} (T_a - T_g) \quad (4)$$

em que:

h_{cg} - coeficiente de transmissão de calor por convecção ao nível do globo [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$].

Onde no caso de convecção natural h_{cg} é calculado por:

$$h_{cg} = 1,4 \left(\frac{\Delta T}{D} \right)^{1/4} \quad (5)$$

No caso de convecção forçada vem:

$$h_{cg} = 6,3 \frac{v_a^{0,6}}{D^{0,4}} \quad (6)$$

em que:

v_a – velocidade do ar ao nível do globo [m/s];

D – diâmetro do globo [m];

As trocas de calor por radiação entre o ar e o globo têm a seguinte expressão:

$$q_r = \varepsilon_g \sigma \left(\bar{T}_r^4 - T_g^4 \right) \quad (7)$$

em que :

ε_g – emissividade do globo negro (adimensional);

σ – constante de Stefan-Boltzmann [$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$];

\bar{T}_r - temperatura média radiante [K];

T_g – temperatura de globo [K].

O balanço térmico do globo final é então:

$$\varepsilon_g \sigma \left(\bar{T}_r^4 - T_g^4 \right) + h_{cg} \left(T_a - T_g \right) = 0 \quad (8)$$

O parâmetro da T_g também pode ser utilizado no cálculo da Temperatura média radiante (\bar{T}_r) através da seguinte expressão:

$$\bar{T}_r = \sqrt[4]{T_g^4 + \frac{h_{cg}}{\varepsilon_g \sigma} (T_g - T_a)} \quad (9)$$

Em regime de convecção natural:

$$\bar{t}_r = \left[(t_g + 273)^4 + \frac{0,25 \times 10^8}{e_g} \left(\frac{|t_g - t_a|}{D} \right)^{1/4} \times (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 \quad (10)$$

No caso de um globo *standard* com um diâmetro de 150mm e emissividade de 0,95 a equação 10 passa a ser:

$$\bar{t}_r = \left[(t_g + 273)^4 + 0,4 \times 10^8 |t_g - t_a|^{1/4} \times (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 \quad (11)$$

Em regime de convecção forçada:

$$\bar{t}_r = \left[(t_g + 273)^4 + \frac{1,1 \times 10^8 \times v_a^{0,6}}{\varepsilon_g \times D^{0,4}} (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 \quad (12)$$

No caso de um globo *standard* com um diâmetro de 150mm e emissividade de 0,95 a equação 12 passa a ser:

$$\bar{t}_r = \left[(t_g + 273)^4 + 2,5 \times 10^8 \times v_a^{0,6} (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 \quad (13)$$

De acordo com a norma ISO 7243 o globo negro *standard*, vd. Figura 2.3., deve ter as seguintes características:

- Diâmetro: 150mm;
- Coeficiente de superfície: 0,95 (cobertura do globo negro);
- Espessura: Mais fino possível;
- Intervalo de medida: 20 °C a 120 °C
- Tolerância: Entre 20°C e 50°C de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$
Entre 50°C e 120°C de $\pm 1^{\circ}\text{C}$

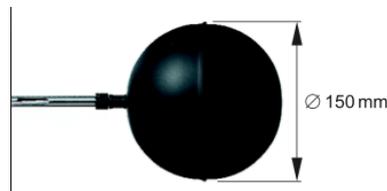


Figura 2.3. Exemplo de globo negro *standard* (www.scientificgear.com)

As medições efetuadas devem seguir os requisitos definidos na norma ISO 7243, no qual são realizadas três medições em simultâneo com níveis de altura diferentes. Recorrendo ao auxílio de um tripé são colocados nove sensores (três de T_g , três de T_a e três de T_{bhn}) nas alturas de 0.1m, 1.1m e 1.7m o que corresponde, para o caso de actividades desenvolvidas em pé, à altura do tornozelo, do abdómen e da cabeça respectivamente (vd. Figura 2.4)



Figura 2.4. Exemplo de montagem do monitor e sensor de stress térmico

Tabela 2.2. Alturas normalizadas para a colocação dos sensores (ISO 7726)

Canal	Pessoa em pé	Pessoa sentada
	[m]	
A (altura da cabeça)	1,7	1,1
B (altura do abdómen)	1,1	0,6
C (altura do tornozelo)	0,1	0,1

Cada conjunto corresponde a um canal (A, B e C) o que nos permite através do monitor de stresse térmico *WBGT* da Brüel & Kjaer, equipamento utilizado neste trabalho, consultar os valores obtidos de cada parâmetro individual como também do *WBGT* e *WBGT* ponderado. Este equipamento não possui cabo de ligação compatível com o computador para a transferência de dados, logo depois de realizadas as medições os dados têm de ser anotados manualmente para posterior análise.

Para a determinação do *WBGT* ponderado recorre-se à expressão seguinte

:

$$WBGT = \frac{WBGT_{cabeça} + (2 \times WBGT_{abdómen}) + WBGT_{tornozelo}}{4} \quad (14)$$

2.3. Equipamentos de Medida

Um dos objetivos desta dissertação é elaborar uma lista com vários equipamentos de medida que existem atualmente no mercado com as suas características mais importantes relativamente à temperatura de globo.

Desse modo elaborou-se a seguinte tabela com algumas características:

Tabela 2.3. – Características dos equipamentos de medida

Equipamento	Modelo	Diâmetro de globo	Temperatura do globo	Tolerância	Tempo de resposta
3M QUESTemp ¹	QUESTemp °32	2" (50,8mm)	0°C - 120°C	± 0,5°C	10min
Campbell Scientific	BlackGlobe	6" (152,4mm)	-5°C - 95°C	± 0,3°C	-
Casella	Microtherm	-	20°C - 120°C	± 1,0°C	20min
Delta OHM	HD 32.2	50mm	-10°C - 100°C	± 0,1°C	15min
Delta OHM	HD 32.3	50mm	-10°C - 100°C	± 0,1°C	15min
Delta OHM	HD 32.1	50mm/150mm	-10°C - 100°C	± 0,25°C	-
Extech	HT30	40mm por 35mm	-30°C - 550°C	± 2°C	-
Instrutherm	TGD-200	6" (152,4mm)	0°C - 90°C	-	25min
KEM	AM-101	-	0°C - 50°C	± 0,5°C	-
KEM ¹	WBGT-103F	24mm	0°C - 60°C	± 1°C	-
Metrosonics	hs-3700	2" (50,8mm)/6" (152,4mm)	0°C - 100°C	± 0,5°C	-
REED	8778	75mm	0°C - 80°C	± 1,5°C	-
Wibget	WBGT 300	6" (152,4mm)/2" (50,8mm)/	-5°C - 100°C	± 0,5 °C	10min
General	WBGT 8758	40mm por 35mm	0°C - 80°C	± 2°C	0,25min
Testo	0554 0670	6" (152,4mm)/	0°C - 120°C	± 1,8°C	
Delta OHM	TP 3275	150mm			

Como se pode ver, nos equipamentos acima caracterizados, os diâmetros variam entre os 24 e os 150mm e o tempo de resposta entre os 0,25 e os 25min. A gama de temperaturas abrangida pelos globos é mais dispersa de um equipamento para o outro, sendo o valor mínimo de -30°C e o valor máximo de 550°C. Por curiosidade referir que estes valores máximos e mínimos pertencem ao mesmo equipamento.

¹ Fazem calibração automática para valores padrão e aceites pela norma

3. DESENVOLVIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1. Instalação Experimental

A instalação experimental utilizada pretende simular um ambiente real semelhante ao que um trabalhador se encontra sujeito na realização das suas tarefas. Embora tenha sido concebida no âmbito de uma dissertação de Mestrado concluída no DEM-FCTUC por Cardoso (2013), foram introduzidas modificações na metodologia de ensaio que procuram responder às sugestões de melhoria então apresentadas.

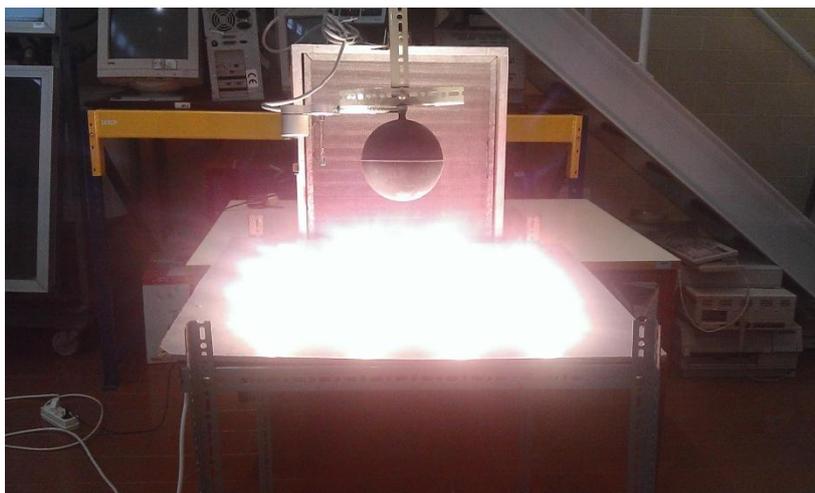


Figura 3.1. Instalação Experimental

Na instalação podemos observar um globo suspenso sobre uma fonte de calor que pretende simular as várias temperaturas que podem ocorrer e um ventilador que nos vai permitir variar a velocidade do escoamento de modo reproduzir situações de trabalho distintas.

Durante os ensaios foi utilizada a seguinte listagem de equipamentos:

- Monitor de stress térmico WBGT (ref. 1219) da Brüel & Kjaer (vd. Figura 3.2);
- Sensor WBGT (ref. MM0030) da Brüel & Kjaer (vd. Figura 3.2);
- Globo negro da Testo de 150 mm (vd. Figura 3.3);

- Monitor Testo 400 (vd. Figura 3.3);
- Globo negro de 50mm de diâmetro e 3mm de espessura (vd. Figura 3.4);
- Data Logger 175-T2 da Testo (vd. Figura 3.4);
- Data Logger 175-H2 da Testo (vd. Figura 3.5);
- Ventilador da Sodeca de 1400 rpm;
- Anemómetro de turbina da Testo
- Painei de 14 lâmpadas dicróicas tipo 13117 da marca Philips com 150W
- Placa/Suporte de madeira de $0,68 \times 0,75 \text{ m}^2$
- Computador Portátil



Figura 3.2. – Monitor e sensor de stresse térmico WBGT da Brüel & Kjaer



Figura 3.3. – Monitor Testo 400 e globo negro da Testo de 150mm



Figura 3.4. – Data Logger 175-T2 da Testo e globo negro de 50mm



Figura 3.5. – Data Logger 175-H2 da Testo

Nos ensaios laboratoriais utilizaram-se dois globos de 150mm (globo negro da Testo e globo negro da Brüel & Kjaer) e o globo de 50mm.

Inicialmente foram realizados ensaios em convecção natural para os três globos, variando a altura do painel de lâmpadas em relação aos globos em cinco alturas diferentes (20cm, 30cm, 40cm, 50cm e 60cm). Posteriormente ligou-se o ventilador (convecção forçada) e realizaram-se ensaios com quatro velocidades diferentes.

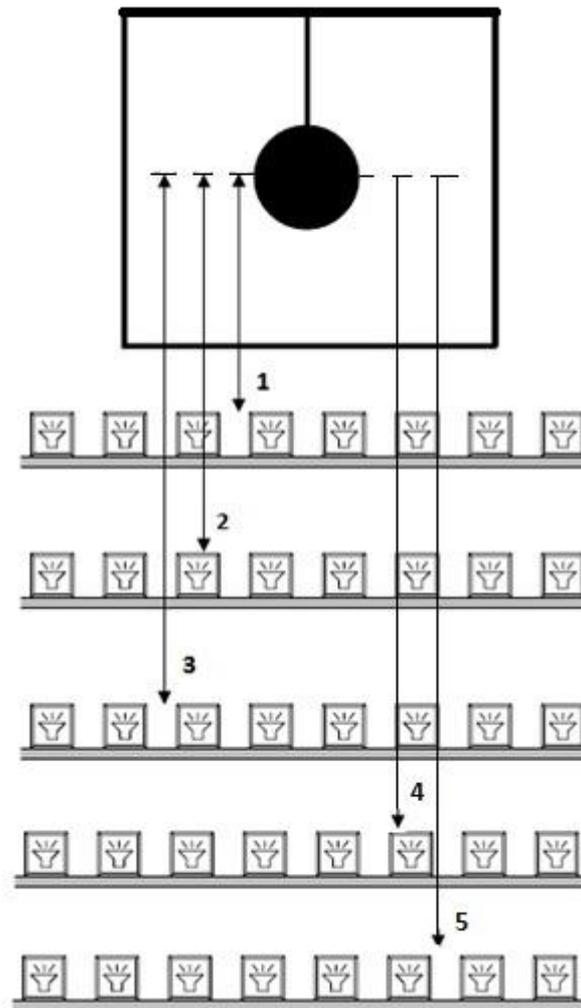


Figura 3.6. – Representação esquemática dos ensaios

Para a medição e registo da temperatura de globo e temperatura do ar foi utilizado o monitor de stresse térmico WBGT da Brüel & Kjaer, o globo negro da Testo ligado à unidade de registo de controlo da Testo 400 e o globo de 50mm ligado ao Data Logger 175-T2 da Testo. Cada ensaio teve a duração de 1 hora, em dias diferentes e horas diferentes, entre os dias 13 de Janeiro e 13 de Fevereiro e posteriormente nos dias 21 e 22 de Maio.

3.2. Determinação das Velocidades de Escoamento

Um aspecto essencial deste estudo consiste em verificar se a velocidade de escoamento à saída do ventilador é uniforme, ou seja, verificar se em determinados pontos do plano vertical da saída do ventilador a diferença entre os valores medidos é significativa.

Uma vez que esta instalação experimental já foi utilizada anteriormente por outros autores, apenas se realizou uma verificação dos valores obtidos das velocidades de escoamento.

Apresenta-se também os procedimentos seguidos anteriormente para a determinação da velocidade de escoamento, que consistiu na medição num total de doze pontos à saída do ventilador através de um anemómetro de turbina da Testo como se pode ver na figura.



Figura 3.7. – Ilustração dos doze pontos à saída do ventilador (adaptado de Cardoso 2013)

Instalou-se um variador de velocidade (vd. Figura 3.8), de modo a variar a velocidade de escoamento, sendo atribuídas cinco posições a que correspondem cinco velocidades de escoamento diferentes (P2, P4, P6, P8 e P10).



Figura 3.8. – Potenciômetro



Figura 3.9. – Ventilador da Sodeca

Depois de algumas tentativas optaram por utilizar dois filtros metálicos no interior da caixa do ventilador de modo a uniformizar o escoamento e obter valores com menores discrepâncias.

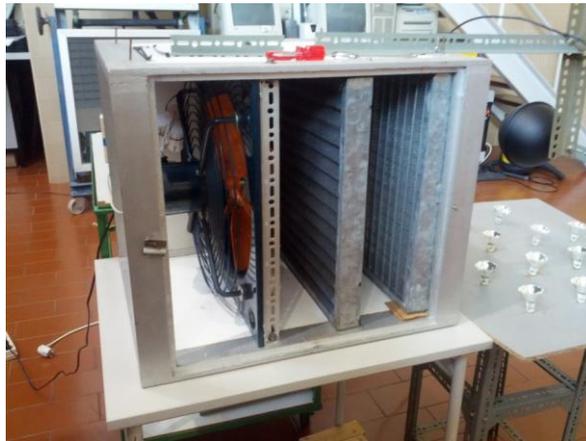


Figura 3.10. – Caixa do ventilador com dois filtros metálicos

Foram obtidos desse modo para as várias velocidades e posições os seguintes valores médios e o valor do respectivo desvio padrão.

Tabela 3.1. – Média e desvio padrão das velocidades nas doze posições com dois filtros no ventilador (adaptado de Cardoso 2013)

Local de medição	Posição do potenciómetro				
	P2 [m/s]	P4 [m/s]	P6 [m/s]	P8 [m/s]	P10 [m/s]
1	0,25	0,88	1,72	2,62	3,07
2	0,31	0,94	1,77	2,58	3,07
3	0,31	0,97	1,78	2,64	3,13
4	0,30	1,05	1,87	2,73	3,26
5	0,41	1,02	1,76	2,49	3,14
6	0,41	0,91	1,63	2,40	2,86
7	0,27	0,87	1,51	2,14	2,64
8	0,27	0,89	1,69	2,58	3,02
9	0,52	0,91	1,70	2,37	2,89
10	0,41	0,96	1,63	2,29	2,81
11	0,44	0,91	1,53	2,17	2,66
12	0,27	0,91	1,60	2,17	2,66
Média	0,35	0,94	1,68	2,43	2,93
Desv Pad	0,09	0,06	0,11	0,20	0,21

Pelos valores obtidos concluíram que quanto maior for a velocidade, maior é o valor do desvio padrão. Admitiram que a velocidade do escoamento, em cada ponto de medição corresponde ao valor médio obtido anteriormente, ou seja:

- $P2 \approx 0,5 \text{ m/s}$
- $P4 \approx 1 \text{ m/s}$
- $P6 \approx 1,5 \text{ m/s}$
- $P8 \approx 2,5 \text{ m/s}$
- $P10 \approx 3 \text{ m/s}$

Uma vez que na prática laboral em ambientes fechados dificilmente se atinge uma velocidade de escoamento na ordem dos 3m/s optou-se por considerar apenas as quatro primeiras velocidades.

No âmbito da dissertação apenas se procedeu a uma verificação dos resultados obtidos por Cardoso D. (2013). Deste modo foi instalado um anemómetro a sensivelmente 40 cm das grelhas do ventilador, como podemos ilustra a 3.11.. Foram feitas medições nos pontos P2, P4, P6 e P8, sendo que cada medição teve a duração de 15m e em seguida apresentamos a média dos resultados obtidos.

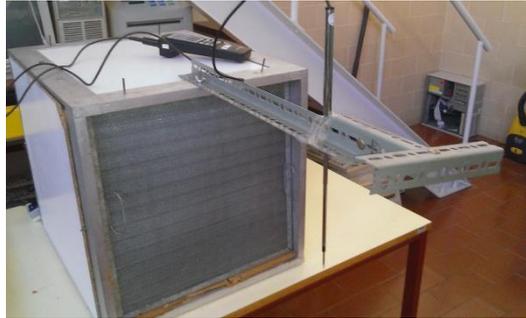


Figura 3.11. – Medições com o anemómetro

Tabela 3.2. – Velocidades obtidas

	Velocidade [m/s]	Máximo	Médio	Mínimo	STD
Ensaio 2	≈0,5	0,52	0,50	0,48	0,006
Ensaio 3	≈1,0	0,98	0,94	0,91	0,015
Ensaio 4	≈1,5	1,45	1,41	1,38	0,013
Ensaio 5	≈1,85	1,85	1,81	1,78	0,013

A tabela 3.2 mostra que nos ensaios 2, 3 e 4 os valores obtidos são semelhantes aos de Cardoso (2013), mas o valor correspondente ao ponto P8 que anteriormente era de 2,5 m/s é agora de 1,85 m/s aproximadamente. Uma vez que esta foi a velocidade máxima que nos foi permitido obter, este foi o valor considerado nos ensaios.

3.3. Condições Ambientais

O espaço escolhido para a realização destas medições foi o laboratório de Climatização e Ambiente do DEM, pois reúne todas as condições necessárias tanto a nível ambiental como a nível da segurança.

A temperatura do ar no laboratório foi monitorizada através do Data Logger Testo 175-H2 ao longo de todo o período de ensaios, com os valores a serem registados de 15 em 15 minutos. Nas tabelas 3.3, 3.4 e 3.5 apresentam-se, para cada equipamento, os valores máximo, médio e mínimo da temperatura do ar e os desvios padrão obtidos em cada ensaio.

Tabela 3.3. – Tabela dos Valores da Temperatura ambiente durante os ensaios com o globo de 150mm da Testo

Equipamento	Distâncias	Velocidade [m/s]	Máximo [°C]	Médio [°C]	Mínimo [°C]	STD [°C]
Testo 150mm	20 cm	0	20,3	20,2	20,0	0,13
		0,5	20,9	20,8	20,6	0,13
		0,94	21,4	21,3	21,1	0,13
		1,41	20,9	20,6	20,3	0,26
		1,81	21,6	21,4	21,2	0,18
	30 cm	0	23,4	23,4	23,4	0,00
		0,5	19,8	19,6	19,4	0,17
		0,94	20,4	20,2	20,0	0,17
		1,41	20,8	20,7	20,6	0,10
		1,81	21,2	21,1	20,9	0,13
	40 cm	0	23,0	23,0	23,0	0,00
		0,5	21,8	21,6	21,4	0,21
		0,94	22,4	22,3	22,1	0,13
		1,41	22,9	22,8	22,6	0,13
		1,81	23,3	23,2	23,1	0,08
	50 cm	0	22,7	22,6	22,6	0,05
		0,5	22,8	22,8	22,7	0,06
		0,94	21,7	21,6	21,4	0,13
		1,41	22,5	22,3	22,1	0,18
		1,81	22,8	22,7	22,6	0,10
	60 cm	0	21,7	21,7	21,6	0,06
		0,5	21,8	21,8	21,7	0,06
		0,94	22,0	21,9	21,8	0,08
		1,41	21,9	21,6	21,3	0,26
1,81		22,5	22,3	22,1	0,18	

O valor máximo e mínimo da temperatura ambiente durante os ensaios com o globo da Testo foram 23,4 e 19,4 °C respectivamente. Ambos a distância de 30 cm, sendo o máximo em regime de convecção natural e o mínimo para uma velocidade de escoamento de 0,5m/s. De salientar que os 23,4 °C foi a temperatura máxima obtida de temperatura ambiente quando comparados os valores de todos equipamentos.

Tabela 3.4. – Tabela dos Valores da Temperatura ambiente durante os ensaios com o globo de 150mm da Brüel & Kjaer

Equipamento	Distâncias	Velocidade [m/s]	Máximo	Médio	Mínimo	STD
Brüel 150mm	20 cm	0	21,4	21,2	21,1	0,14
		0,5	22,6	22,6	22,5	0,05
		0,94	22,6	22,5	22,4	0,10
		1,41	22,3	22,3	22,2	0,06
		1,81	22,0	21,8	21,5	0,21
	30 cm	0	21,4	21,3	21,1	0,13
		0,5	22,1	22,1	22,0	0,06
		0,94	22,2	22,2	22,2	0,00
		1,41	21,0	20,9	20,7	0,13
		1,81	22,4	22,4	22,3	0,05
	40 cm	0	21,8	21,7	21,5	0,13
		0,5	22,7	22,6	22,5	0,08
		0,94	22,0	21,7	21,5	0,22
		1,41	22,3	22,2	22,0	0,13
		1,81	23,0	22,9	22,9	0,05
	50 cm	0	22,0	22,0	21,9	0,05
		0,5	23,2	23,0	22,8	0,17
		0,94	21,3	21,2	21,1	0,10
		1,41	21,8	21,7	21,5	0,13
		1,81	22,6	22,4	22,2	0,17
	60 cm	0	20,5	20,3	19,9	0,26
		0,5	21,1	21,0	20,9	0,10
		0,94	21,6	21,5	21,5	0,05
		1,41	22,0	22,0	21,9	0,06
1,81		21,5	21,4	21,2	0,13	

O valor máximo de temperatura ambiente obtido durante os ensaios com o globo da Brüel & Kjaer foi de 23,2 °C para uma velocidade de escoamento de 0,5 m/s a uma distância de 50 cm. O valor mínimo foi de 19,9 °C em convecção natural a uma distância de 60 cm.

Tabela 3.5. – Tabela dos Valores da Temperatura ambiente durante os ensaios com o globo de 50mm

Equipamento	Distâncias	Velocidade [m/s]	Máximo	Médio	Mínimo	STD
Testo 50mm	20 cm	0	21,8	21,8	21,7	0,05
		0,5	22,1	22,0	21,9	0,10
		0,94	20,3	20,0	19,6	0,30
		1,41	21,0	20,8	20,5	0,22
		1,81	21,6	21,5	21,5	0,05
	30 cm	0	21,5	21,4	21,3	0,08
		0,5	21,8	21,7	21,6	0,10
		0,94	22,2	22,1	22,0	0,10
		1,41	22,5	22,4	22,3	0,10
		1,81	21,4	21,4	21,4	0,00
	40 cm	0	22,6	22,6	22,5	0,06
		0,5	18,1	17,8	17,5	0,26
		0,94	19,2	19,0	18,8	0,17
		1,41	19,9	19,7	19,4	0,21
		1,81	21,4	21,4	21,4	0,00
	50 cm	0	21,4	21,3	21,2	0,08
		0,5	20,0	21,0	20,8	0,34
		0,94	21,1	21,0	20,9	0,10
		1,41	21,1	21,0	20,9	0,10
		1,81	21,5	21,5	21,3	0,10
	60 cm	0	20,3	20,2	20,0	0,14
		0,5	20,6	20,5	20,3	0,13
		0,94	20,9	20,8	20,8	0,05
		1,41	21,1	21,1	21,0	0,05
1,81		21,4	21,2	21,1	0,14	

No caso dos valores obtidos para a temperatura ambiente quando realizados os ensaios com o globo de 50mm, o valor máximo obtido foi de 22,6 °C para uma distância de 40 cm em convecção natural. O valor mínimo obtido ocorreu a 40 cm a uma velocidade de 0,5 m/s e foi de 17,5 °C, sendo este o valor mínimo da temperatura ambiente obtido quando comparados os valores de todos os equipamentos.

3.4. Apresentação e Discussão de Resultados

Este capítulo tem como objectivo comparar os resultados das medições efectuadas com os globos negros de 150 mm das marcas Testo e Brüel & Kjaer e o globo negro de 50 mm, assim como comparar as suas temperaturas e tempos de resposta durante o período de ensaios quando sujeitos às mesmas condições. Realizaram-se 75 ensaios, sendo que o período de ensaio foi de 60 minutos com uma taxa de aquisição de 1 minuto.

Os tempos de resposta dos sensores é definido como o período de tempo necessário para atingir t_r , sendo também apresentado o tempo necessário para atingir 90% desse valor.

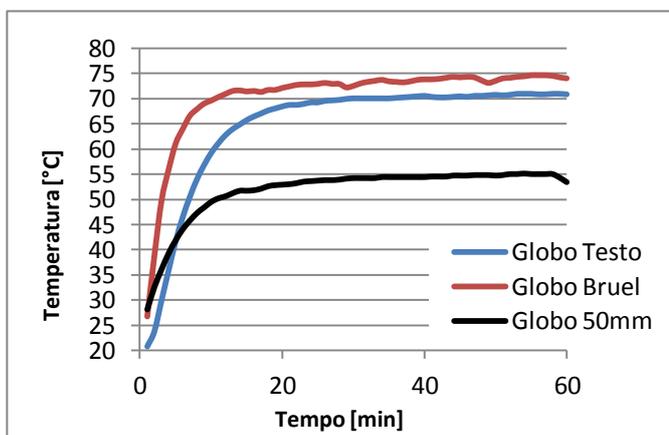
Na tabela 3.6 apresentam-se as velocidades de referência admitidas para cada ensaio.

Tabela 3.6. – Descrição dos diversos ensaios

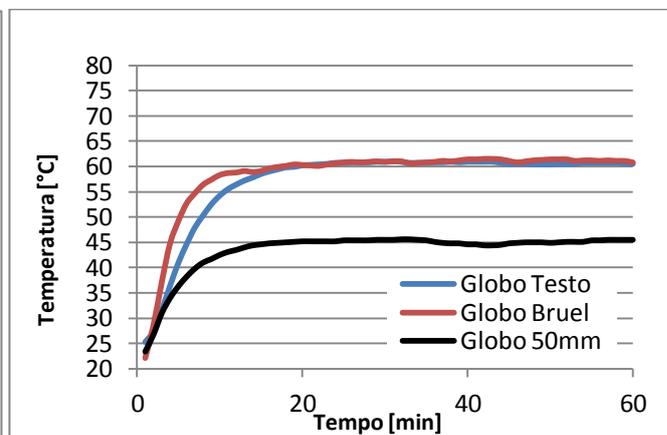
Ensaio 1	$v = 0 \text{ m/s}$ (convecção natural)
Ensaio 2	$V = 0,5 \text{ m/s}$
Ensaio 3	$v = 0,94 \text{ m/s}$
Ensaio 4	$v = 1,41 \text{ m/s}$
Ensaio 5	$v = 1,81 \text{ m/s}$

Ensaio 1 Convecção Natural

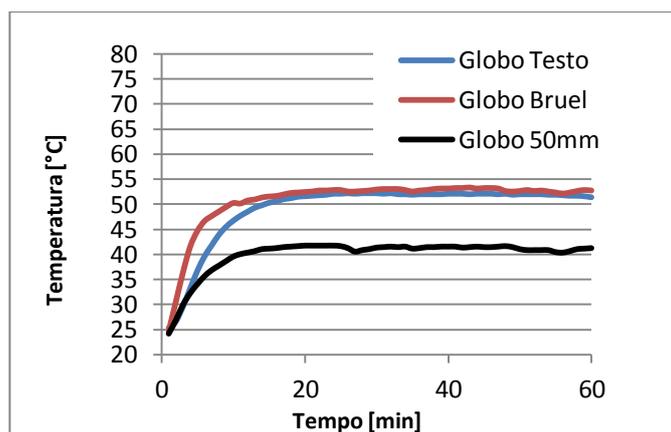
Altura de 20 cm



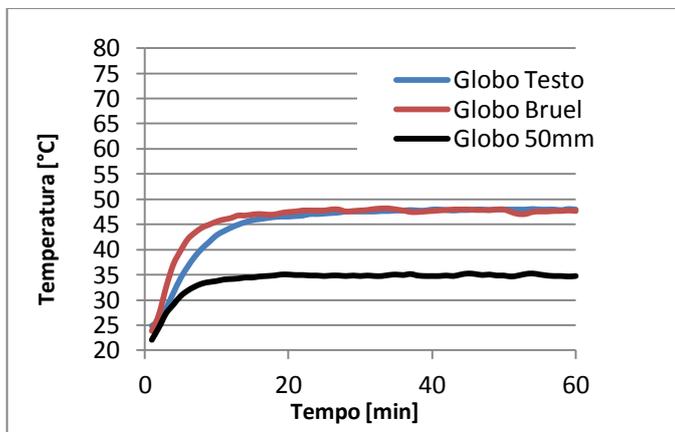
Altura de 30 cm



Altura de 40 cm



Altura de 50 cm



Altura de 60 cm

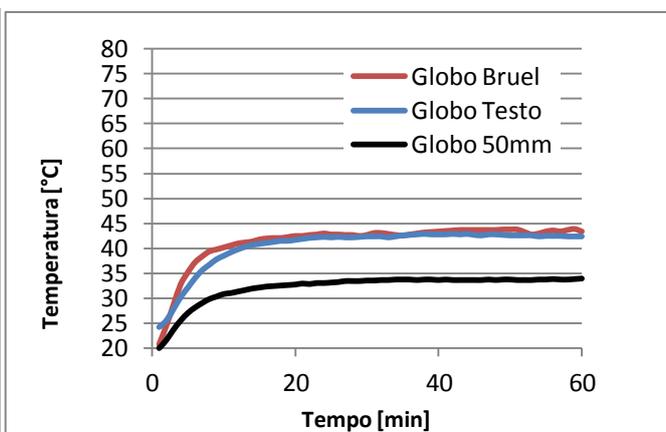


Figura 3.12. Representação gráfica da evolução das temperaturas de globo negro da Testo, globo negro da Brüel & Kjaer e globo negro de 50mm (ensaio 1)

Tabela 3.7. – Minuto inicial do período estável e temperaturas médias desse respectivo período (ensaio 1)

	Minuto Admitido como início do período estável			Valor médio desde o início do período estável		
	G. Brüel	G. Testo	G. 50mm	G. Brüel	G. Testo	G. 50mm
Altura de 20 cm	22	30	34	73,7 °C	70,4 °C	54,7 °C
Altura de 30 cm	25	26	25	61,1°C	60,7 °C	45,1 °C
Altura de 40 cm	22	24	31	52,9°C	52,0 °C	41,5 °C
Altura de 50 cm	22	35	23	47,7 °C	47,8 °C	34,9 °C
Altura de 60 cm	31	24	30	43,4 °C	42,6 °C	33,7 °C

Tabela 3.8. – Tempo necessário para se atingir a temperatura final e 90% desse valor (ensaio 1)

	Globo Negro Brüel Tempo necessário para atingir		Globo Negro Testo Tempo necessário para atingir		Globo Negro 50mm Tempo necessário para atingir	
	tf	90% × tf	tf	90% × tf	tf	90% × tf
Altura de 20 cm	34 min	7 min	39 min	13 min	44 min	10 min
Altura de 30 cm	37 min	8 min	24 min	11 min	19 min	8 min
Altura de 40 cm	24 min	7 min	24 min	11 min	17 min	8 min
Altura de 50 cm	22 min	7 min	40 min	11 min	18 min	6 min
Altura de 60 cm	40 min	9 min	35 min	10 min	34 min	10 min

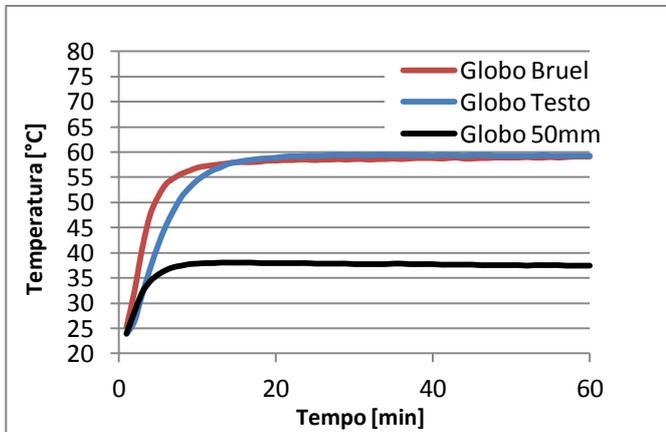
A Tabela 3.7. mostra que os valores mais elevados correspondem à menor distância entre o sensor e a fonte de calor. No caso do globo de 50 mm, os resultados mostram que a temperatura variou entre 33,7 e 54,7°C. Os valores correspondentes para os sensores 150 mm foram de 42,6 e 73,7°C. O globo de 50 mm apresenta valores inferiores aos globos de 150 mm, e entre estes o globo da Brüel tem, na maioria dos casos (quatro em cinco) valores mais elevados.

Relativamente ao tempo de resposta, para o globo de 50 mm, este varia entre 17 e 44 minutos. A gama correspondente para os Globos de 150 mm foi de 22 e 40 minutos e 24 e 40 minutos, respectivamente, para os globos de Brüel & Kjaer e Testo. Os resultados colocam em evidência o menor tempo de resposta do globo de 50 mm.

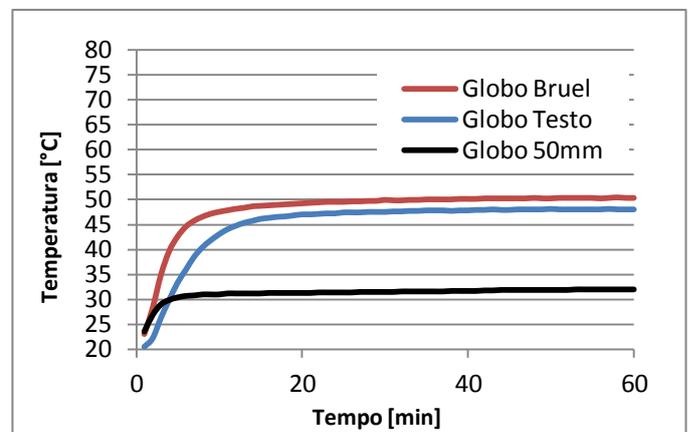
Ensaio 2

$V = 0,5 \text{ m/s}$

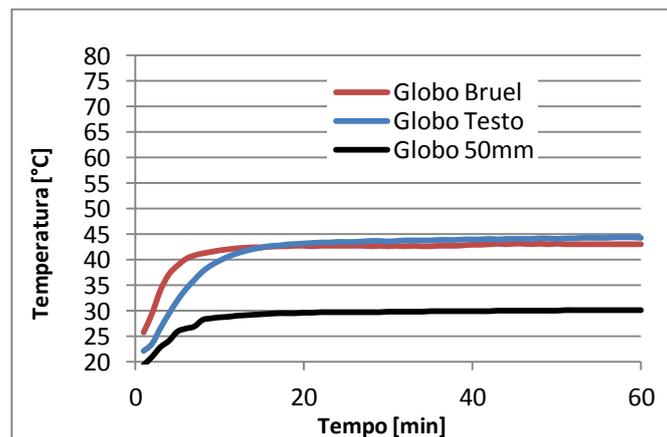
Altura de 20 cm



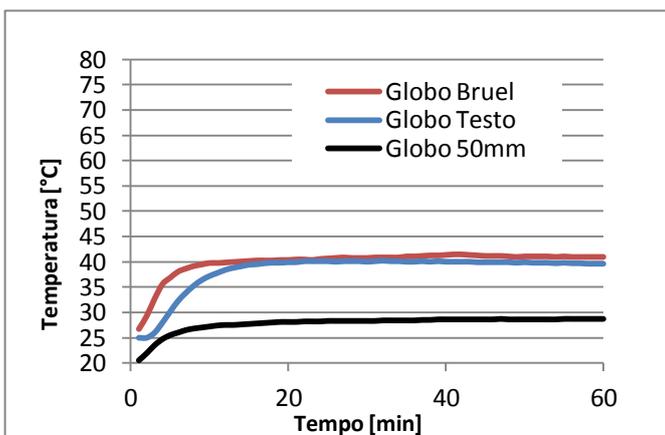
Altura de 30 cm



Altura de 40 cm



Altura de 50 cm



Altura de 60 cm

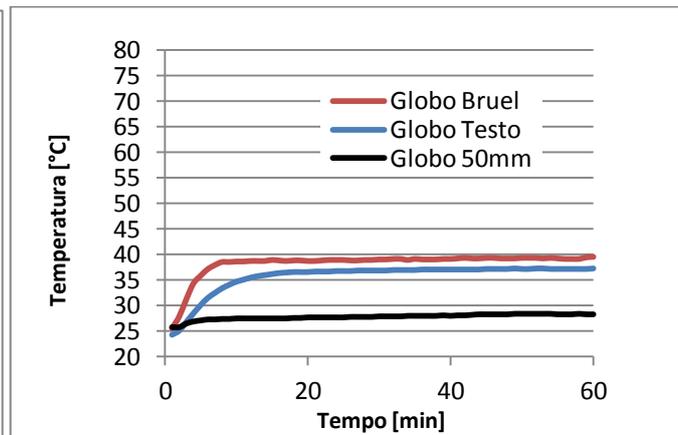


Figura 3.13. Representação gráfica da evolução das temperaturas de globo negro da Testo, globo negro da Brüel & Kjaer e globo negro de 50mm (ensaio 2)

Tabela 3.9. – Minuto inicial do período estável e temperaturas médias desse respectivo período (ensaio 2)

	Minuto Admitido como início do período estável			Valor médio desde o início do período estável		
	G. Brüel	G. Testo	G. 50mm	G. Brüel	G. Testo	G. 50mm
Altura de 20 cm	23	24	25	58,8 °C	59,4 °C	37,7 °C
Altura de 30 cm	30	35	11	50,3 °C	48,0 °C	31,6 °C
Altura de 40 cm	19	27	26	43,0 °C	44,1 °C	29,9 °C
Altura de 50 cm	27	22	29	41,1 °C	40,0 °C	28,8 °C
Altura de 60 cm	16	27	20	39,1 °C	37,1 °C	28,1 °C

Tabela 3.10. – Tempo necessário para se atingir a temperatura final e 90% desse valor (ensaio 2)

	Globo Negro Brüel Tempo necessário para atingir		Globo Negro Testo Tempo necessário para atingir		Globo Negro 50mm Tempo necessário para atingir	
	tf	90% × tf	tf	90% × tf	tf	90% × tf
Altura de 20 cm	38 min	6 min	27 min	10 min	9 min	4 min
Altura de 30 cm	42 min	7 min	43 min	11 min	32 min	3 min
Altura de 40 cm	40 min	5 min	42 min	10 min	35 min	7 min
Altura de 50 cm	35 min	6 min	22 min	9 min	39 min	6 min
Altura de 60 cm	32 min	5 min	36 min	8 min	39 min	1 min

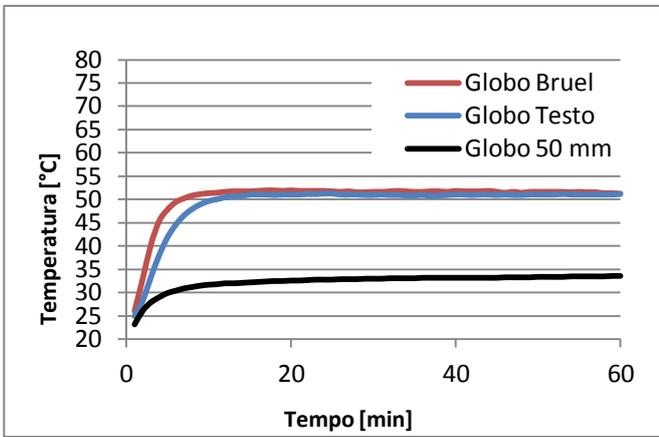
Neste ensaio verifica-se praticamente o mesmo que anteriormente mas neste caso os resultados relativos ao globo de 50mm mostram que a temperatura variou entre 28,1 e 37,7 °C. Os valores correspondentes para os sensores de 150 mm foram de 37,1 e 59,4°C. O globo de 50 mm apresenta novamente valores inferiores aos globos de 150 mm, e entre estes o globo da Brüel tem valores mais elevados na maioria dos casos (três em cinco).

Relativamente ao tempo de resposta, para o globo de 50 mm, este varia entre 9 e 39 minutos. A gama correspondente para os globos de 150 mm foi de 32 e 42 minutos e 22 e 42 minutos, respectivamente, para os globos de Brüel & Kjaer e Testo. Neste caso os resultados mostram que o tempo de resposta do globo de 50 mm aumentou.

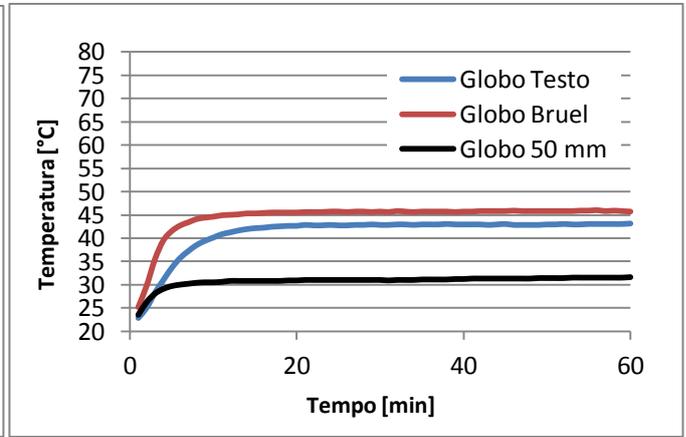
Ensaio 3

$V = 0,94 \text{ m/s}$

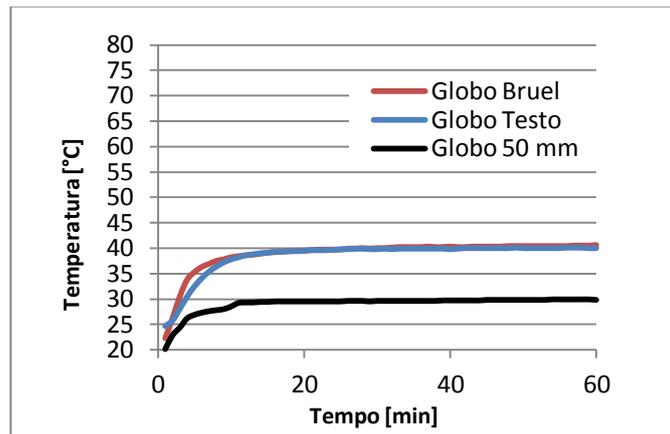
Altura de 20 cm



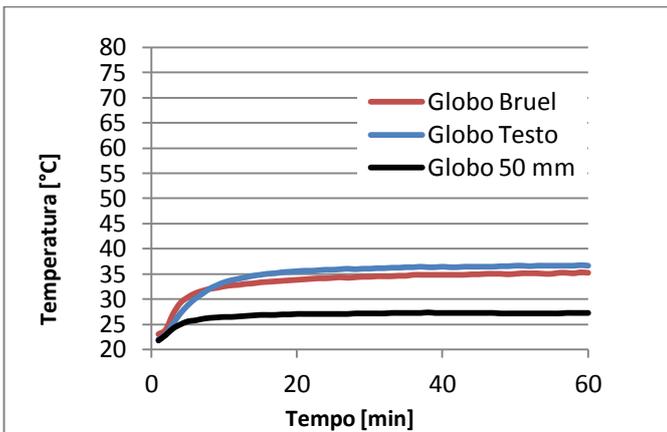
Altura de 30 cm



Altura de 40 cm



Altura de 50 cm



Altura de 60 cm

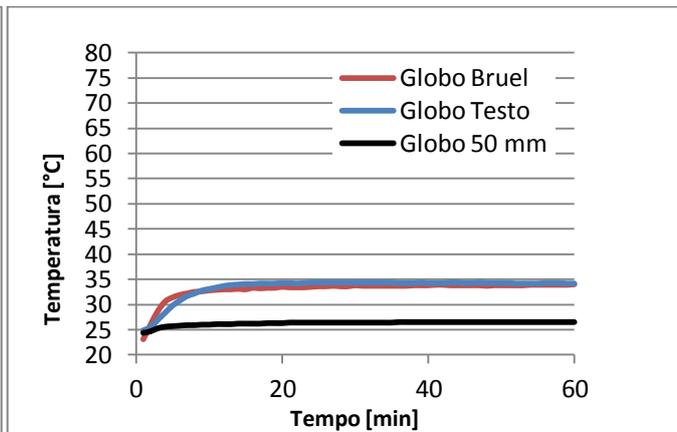


Figura 3.14. Representação gráfica da evolução das temperaturas de globo negro da Testo, globo negro da Brüel & Kjaer e globo negro de 50mm (ensaio 3)

Tabela 3.11. – Minuto inicial do período estável e temperaturas médias desse respectivo período (ensaio 3)

	Minuto Admitido como início do período estável			Valor médio desde o início do período estável		
	G. Brüel	G. Testo	G. 50mm	G. Brüel	G. Testo	G. 50mm
Altura de 20 cm	21	22	29	51,6 °C	51,1 °C	33,2 °C
Altura de 30 cm	24	22	21	45,8 °C	42,9 °C	31,3 °C
Altura de 40 cm	26	25	26	40,3 °C	40,0 °C	29,7 °C
Altura de 50 cm	36	35	20	35,1 °C	36,6 °C	27,2 °C
Altura de 60 cm	27	24	21	33,8 °C	34,3 °C	26,5 °C

Tabela 3.12. – Tempo necessário para se atingir a temperatura final e 90% desse valor (ensaio 3)

	Globo Negro Brüel Tempo necessário para atingir		Globo Negro Testo Tempo necessário para atingir		Globo Negro 50mm Tempo necessário para atingir	
	tf	90% × tf	tf	90% × tf	tf	90% × tf
Altura de 20 cm	12 min	5 min	15 min	7 min	36 min	5 min
Altura de 30 cm	32 min	5 min	29 min	9 min	41 min	4 min
Altura de 40 cm	37 min	6 min	42 min	8 min	39 min	5 min
Altura de 50 cm	46 min	7 min	48 min	10 min	28 min	4 min
Altura de 60 cm	30 min	4 min	20 min	7 min	36 min	1 min

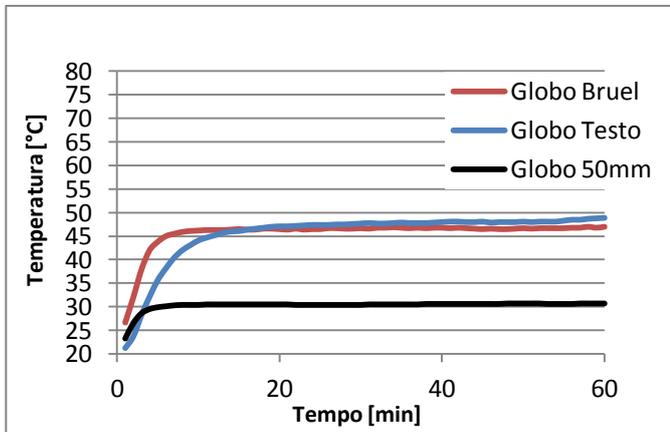
Os resultados obtidos neste ensaio seguem o padrão dos anteriores, verificando-se para o globo de 50 mm que a temperatura variou entre 26,1 e 33,2 ° C. A variação correspondente para os sensores 150 mm foi de 33,8 e 51,6 ° C. O globo de 50 mm apresenta novamente valores de temperatura mais reduzidos do que os globos de 150 mm, e entre estes o globo da Brüel tem valores mais elevados na maioria dos casos (três em cinco).

O tempo de resposta, para o globo de 50 mm, varia entre 28 e 41 minutos. A gama correspondente para os globos de 150 mm foi de 12 e 46 minutos (Brüel) e 15 e 48 minutos (Testo). Os resultados mostram que o tempo de resposta do globo de 50 mm aumentou novamente e que passa a ser mais lento que o tempo de resposta dos globos 150 mm, isto deve-se talvez ao facto de existirem dois valores (Brüel e Testo) no ensaio a 20 cm com tempos de resposta inferiores ao normal, talvez pelo tempo de repouso (arrefecimento do globo) não ter sido o suficiente.

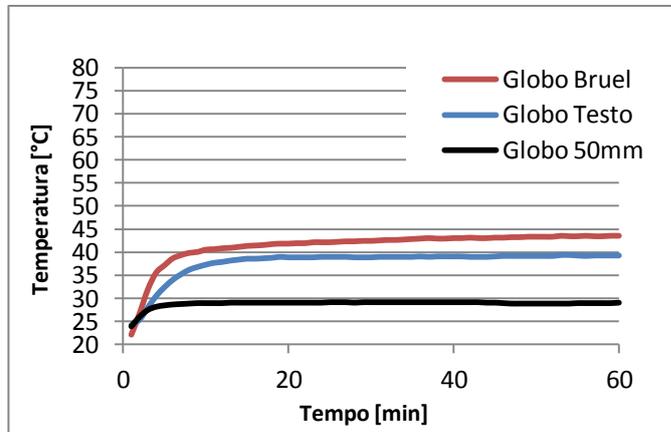
Ensaio 4

V = 1,41 m/s

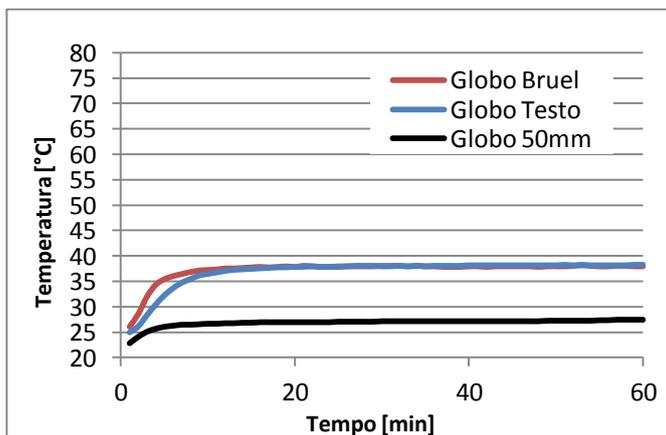
Altura de 20 cm



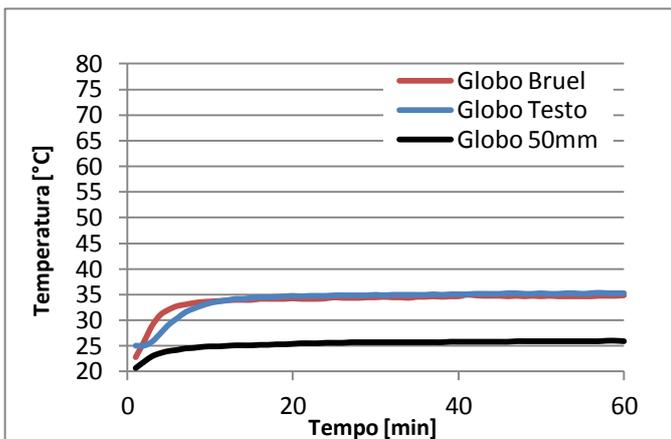
Altura de 30 cm



Altura de 40 cm



Altura de 50 cm



Altura de 60 cm

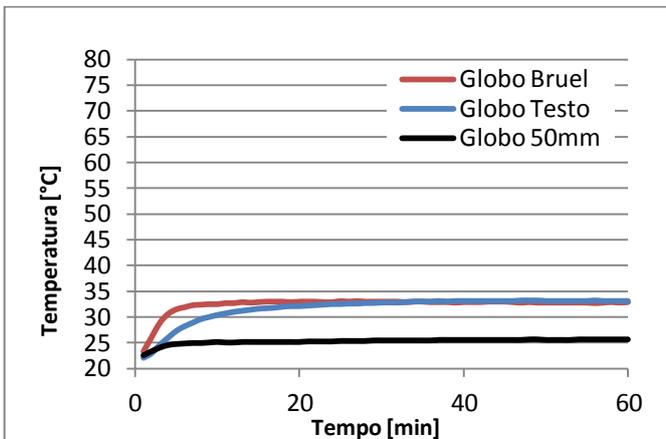


Figura 3.15. Representação gráfica da evolução das temperaturas de globo negro da Testo, globo negro da Brüel & Kjaer e globo negro de 50mm (ensaio 4)

Tabela 3.13. – Minuto inicial do período estável e temperaturas médias desse respectivo período (ensaio 4)

	Minuto Admitido como início do período estável			Valor médio desde o início do período estável		
	G. Bruel	G. Testo	G. 50mm	G. Bruel	G. Testo	G. 50mm
Altura de 20 cm	26	30	22	46,7 °C	47,9 °C	30,6 °C
Altura de 30 cm	36	24	13	43,2 °C	39,1 °C	29,1 °C
Altura de 40 cm	22	25	25	37,9 °C	38,1 °C	27,2 °C
Altura de 50 cm	25	25	27	34,7 °C	35,1 °C	25,8 °C
Altura de 60 cm	16	34	25	32,9 °C	33,1 °C	25,6 °C

Tabela 3.14. – Tempo necessário para se atingir a temperatura final e 90% desse valor (ensaio 4)

	Globo Negro Bruel Tempo necessário para atingir		Globo Negro Testo Tempo necessário para atingir		Globo Negro 50mm Tempo necessário para atingir	
	tf	90% × tf	tf	90% × tf	tf	90% × tf
Altura de 20 cm	26 min	5 min	40 min	10 min	38 min	3 min
Altura de 30 cm	47 min	7 min	36 min	7 min	13 min	3 min
Altura de 40 cm	19 min	4 min	40 min	7 min	30 min	3 min
Altura de 50 cm	37 min	5 min	42 min	8 min	39 min	4 min
Altura de 60 cm	13 min	4 min	37 min	9 min	37 min	2 min

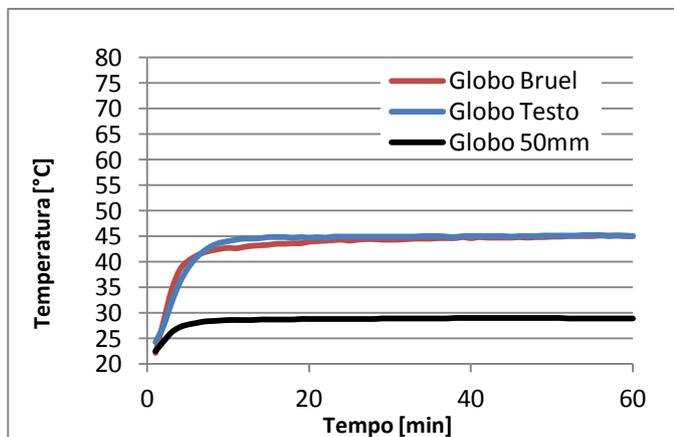
No ensaio 4 reproduzem-se, genericamente, as considerações tecidas relativamente aos resultados anteriores. Mais uma vez se verifica um comportamento semelhante nos diferentes sensores sendo que no globo de 50mm os resultados mostram que variou entre os 25,6 e os 30,6°C. As variações correspondentes para os sensores de 150mm foram de 32,9 e 47,9 °C para o globo da Brüel e 33,1 a 47,9° C para o da Testo. O globo de 50 mm apresenta novamente valores inferiores aos globos de 150 mm, e entre estes pela primeira vez o globo da Testo tem valores mais elevados na maioria dos casos (quatro em cinco).

Para o globo de 50mm o tempo de resposta mínimo foi de 13min e o máximo de 39 min. A gama correspondente para os globos de 150 mm foi de 13 e 47 minutos e 36 e 42 minutos, respectivamente, para os globos de Brüel & Kjaer e Testo. Neste caso os resultados mostram que o tempo de resposta do globo de 50 mm diminuiu em relação ao ensaio anterior e passa a ser inferior ao tempo de resposta do globo 150 mm da Testo mas superior ao da Brüel, mais uma vez devido a dois tempos obtidos inferiores ao esperado pelas mesmas razões.

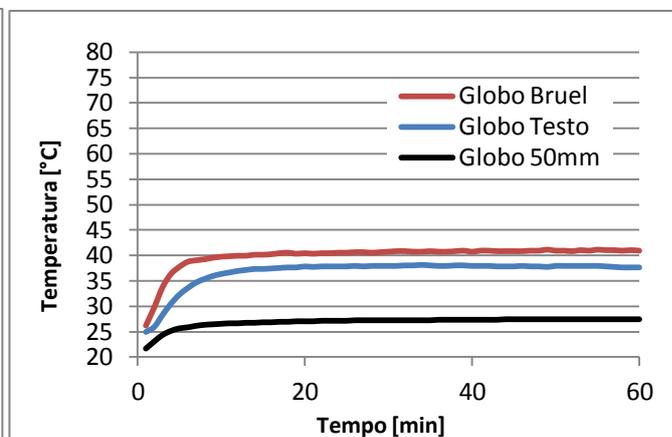
Ensaio 5

V = 1,81 m/s

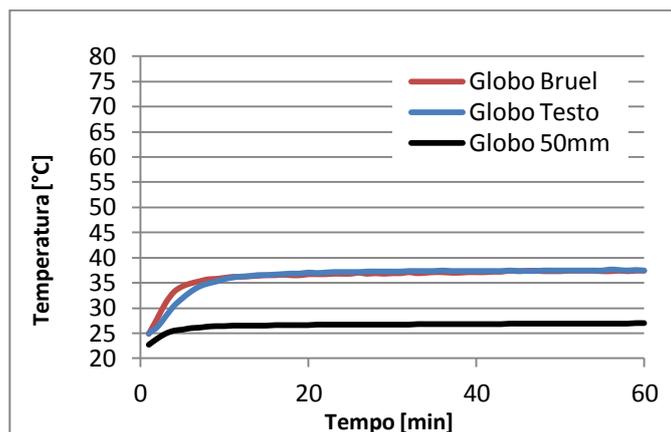
Altura de 20 cm



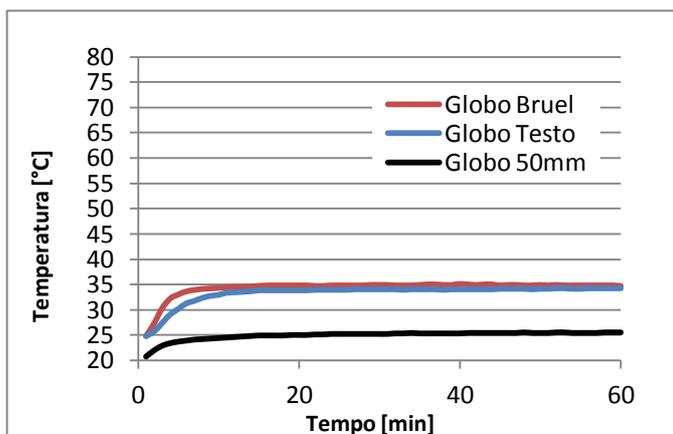
Altura de 30 cm



Altura de 40 cm



Altura de 50 cm



Altura de 60 cm

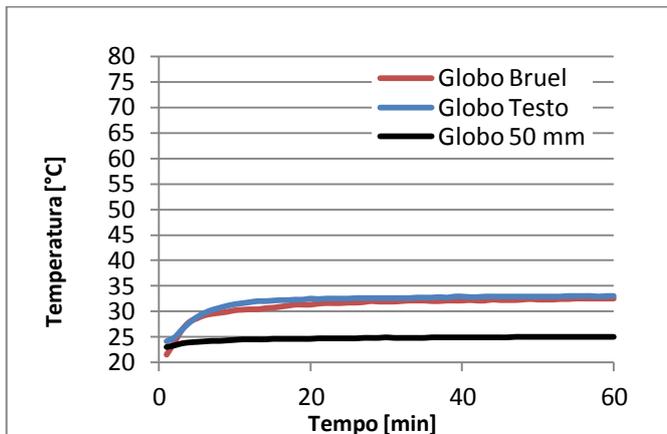


Figura 3.16. Representação gráfica da evolução das temperaturas de globo negro da Testo, globo negro da Brüel & Kjaer e globo negro de 50mm (ensaio 5)

Tabela 3.15. – Minuto inicial do período estável e temperaturas médias desse respectivo período (ensaio 5)

	Minuto Admitido como início do período estável			Valor médio desde o início do período estável		
	G. Bruel	G. Testo	G. 50mm	G. Bruel	G. Testo	G. 50mm
Altura de 20 cm	26	23	19	44,7 °C	45,0 °C	28,9 °C
Altura de 30 cm	22	22	26	40,9 °C	38,0 °C	27,4 °C
Altura de 40 cm	23	27	21	37,2 °C	37,3 °C	26,8 °C
Altura de 50 cm	24	22	24	34,1 °C	34,1 °C	25,4 °C
Altura de 60 cm	32	22	27	32,3 °C	32,9 °C	25,0 °C

Tabela 3.16. – Tempo necessário para se atingir a temperatura final e 90% desse valor (ensaio 5)

	Globo Negro Bruel Tempo necessário para atingir		Globo Negro Testo Tempo necessário para atingir		Globo Negro 50mm Tempo necessário para atingir	
	tf	90% × tf	tf	90% × tf	tf	90% × tf
Altura de 20 cm	39 min	6 min	34 min	6 min	29 min	3 min
Altura de 30 cm	31 min	5 min	26 min	7 min	36 min	4 min
Altura de 40 cm	42 min	5 min	32 min	7 min	33 min	3 min
Altura de 50 cm	16 min	4 min	27 min	6 min	34 min	3 min
Altura de 60 cm	41 min	8 min	39 min	6 min	30 min	1 min

Neste ensaio os resultados mostram que a temperatura no globo de 50 mm variou 25,0-28,9°C. Os valores correspondentes para os sensores 150 mm foram de 32,3 a 44,7°C para o da Brüel e 32,9 a 45,0 °C. O globo de 50 mm apresenta novamente valores mais baixos do que os globos 150 mm, e entre estes o globo da Testo tem novamente valores mais elevados na maioria dos casos (três em cinco).

Relativamente ao tempo de resposta, para o globo de 50 mm, este varia entre 29 e 36 minutos. A faixa correspondente para os Globos de 150 mm foi de 16 e 42 minutos e 26 e 39 minutos, respectivamente, para os globos de Brüel & Kjaer e Testo. Neste caso os resultados mostram que o tempo de resposta do globo de 50 mm aumenta ligeiramente em relação ao ensaio anterior tendo um tempo de resposta superior ao globo 150 mm da Testo mas inferior ao da Brüel & Kjaer.

3.5. Análise Global

Neste subcapítulo são apresentadas as análises globais dos resultados obtidos.

3.5.1. Condições Térmicas

Na tabela 3.17 coligem-se os valores da temperatura de globo obtidos em cada ensaio.

Tabela 3.17. – Condições térmicas dos ensaios

Ensaio	Distância	Temperatura Final (tf) [°C]		
		G. 50mm	G. Bruel	G. Testo
Convecção Natural	20 cm	54,7	73,7	70,4
	30 cm	45,1	61,1	60,7
	40 cm	41,5	52,9	52,0
	50 cm	34,9	47,7	47,8
	60 cm	33,7	43,4	42,6
v = 0,50 m/s	20 cm	37,7	58,8	59,4
	30 cm	31,6	50,3	48,0
	40 cm	29,9	43,0	44,1
	50 cm	28,8	41,1	40,0
	60 cm	28,1	39,1	37,1
v = 0,94 m/s	20 cm	33,2	51,6	51,1
	30 cm	31,3	45,8	42,9
	40 cm	29,7	40,3	40,0
	50 cm	27,2	35,1	36,6
	60 cm	26,5	33,8	34,3
v = 1,41 m/s	20 cm	30,6	46,7	47,9
	30 cm	29,1	43,2	39,1
	40 cm	27,2	37,9	38,1
	50 cm	25,8	34,7	35,1
	60 cm	25,6	32,9	33,1
v = 1,85 m/s	20 cm	28,9	44,7	45,0
	30 cm	27,4	40,9	38,0
	40 cm	26,8	37,2	37,3
	50 cm	25,4	34,1	34,1
	60 cm	25,0	32,3	32,9
Dimensão	20 cm	28,9 - 54,7	44,7 - 73,7	45,0 - 70,4
	30 cm	27,4 - 45,1	40,9 - 61,1	38,0 - 60,7
	40 cm	26,8 - 41,5	37,2 - 52,9	37,3 - 52,0
	50 cm	25,4 - 34,9	34,1 - 47,7	34,1 - 47,8
	60 cm	25,0 - 33,7	32,3 - 43,4	32,9 - 42,6

Como era esperado, verifica-se que os valores mais elevados correspondem à menor distância entre o sensor e a fonte de calor.

No caso do globo de 50mm, os resultados mostram que a temperatura variou entre 25,0°C e 54,7°C. Os valores correspondentes para os globos de 150mm foram 32,3°C e 73,4°C. O globo de 50mm apresenta valores menores que os globos de 150mm e entre estes o globo da Brüel & Kjaer tem valores superiores na maioria dos casos. Finalmente em cada sensor verifica-se que a temperatura diminui com o aumento da velocidade de escoamento.

3.5.2. Tempo de Resposta

Um globo *standard* com um termómetro de mercúrio no centro demora entre 20 a 30 minutos a atingir o equilíbrio. O processo é complicado, uma vez que é necessário três componentes atingirem o equilíbrio, sendo estes componentes, o metal do próprio globo, o ar contido dentro deste e o termómetro. As capacidades caloríficas dos sensores são respectivamente cerca de 150 J/°C, 2 J/°C e 7 J/°C. A área de superfície é cerca de 720 cm² e a capacidade calorífica total aproximadamente 2200 J / m² onde 94% é devido ao metal do globo (Kerslake 1972).

Se o calor obtido pelo ar e pelo termómetro forem desprezados, é expectável que o globo atinja o equilíbrio a uma constante de tempo de 2200/h₀ segundos. A constante de tempo, k, na expressão que descreve a aproximação à temperatura de equilíbrio num sistema simples é:

$$(T_{\infty} - T_t) = (T_{\infty} - T_{t_0})e^{-t/k}$$

Onde:

T_{∞} - Temperatura final de equilíbrio [°C]

T_t - Temperatura no instante t [°C]

T_{t_0} - Temperatura no instante 0 [°C]

t - Tempo [s]

Para uma velocidade de escoamento de 0,1 m/s, o valor de h_0 para o globo é aproximadamente $10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, logo a constante de tempo vai ser 220s (3,7 minutos). O equilíbrio é rigorosamente aproximado (98% completo) após quatro constantes de tempo, cerca de 15 minutos. Na prática, o termómetro aproxima-se do equilíbrio mais lentamente do que os 15 minutos, devido à baixa condutância entre o globo e o termómetro.

Isto sugere que reduzir a espessura do metal, não vai ter muito efeito na velocidade geral do tempo de resposta, como Hellon & Crockford (1959) demonstraram experimentalmente.

A Tabela 3.18 caracteriza o tempo de resposta de cada globo para cada ensaio, apresentando o tempo necessário que cada sensor demorou a atingir a temperatura final.

Tabela 3.18. – Tempo de resposta dos sensores

Ensaio	Distância	Tempo de resposta [min]		
		G. 50mm	G. Bruel	G. Testo
		tf	tf	tf
Convecção Natural	20 cm	44 min	34 min	39 min
	30 cm	19 min	37 min	24 min
	40 cm	17 min	24 min	24 min
	50 cm	18 min	22 min	40 min
	60 cm	34 min	40 min	35 min
$v = 0,50 \text{ m/s}$	20 cm	9 min	38 min	27 min
	30 cm	32 min	42 min	43 min
	40 cm	35 min	40 min	42 min
	50 cm	39 min	35 min	22 min
	60 cm	39 min	32 min	36 min
$v = 0,94 \text{ m/s}$	20 cm	36 min	12 min	15 min
	30 cm	41 min	32 min	29 min
	40 cm	39 min	37 min	42 min
	50 cm	28 min	46 min	48 min
	60 cm	36 min	30 min	20 min
$v = 1,41 \text{ m/s}$	20 cm	38 min	26 min	40 min
	30 cm	13 min	47 min	36 min
	40 cm	30 min	19 min	40 min
	50 cm	39 min	37 min	42 min
	60 cm	37 min	13 min	37 min
$v = 1,85 \text{ m/s}$	20 cm	29 min	39 min	34 min
	30 cm	36 min	31 min	26 min
	40 cm	33 min	42 min	32 min
	50 cm	34 min	16 min	27 min
	60 cm	30 min	41 min	39 min

Para o globo de 50mm, o tempo de resposta variou entre 9 e 44 minutos. A gama correspondente para os globos de 150mm foi de 12 e 46 minutos e de 15 e 48 minutos para os equipamentos da Brüel & Kjaer e da Testo respectivamente. Os resultados põem em evidência o tempo de resposta mais rápido do globo de 50mm na maioria dos casos.

Os resultados mostram também que o tempo de resposta dos globos de 150mm ultrapassou em alguns casos o intervalo de 20-30 minutos considerado como referencia. Verificou-se que por vezes a temperatura final é obtida decorridos mais de 40 minutos.

É importante ter também em conta que a maior temperatura obtida nestes ensaios foi de 73,7 °C, desse modo é expectável esperar por tempos de resposta superiores no caso de ambientes com temperaturas de globo mais elevadas.

3.5.3. Diferença de Temperatura entre os Globos de 150 e 50mm

Nesta secção, são apresentadas as diferenças de temperaturas obtidas entre os globos de 150mm e o globo de 50mm. Para cada distância entre o globo e a fonte de calor obtém-se a respectiva diferença de temperatura, associando-se a cada ensaio um código de cores.

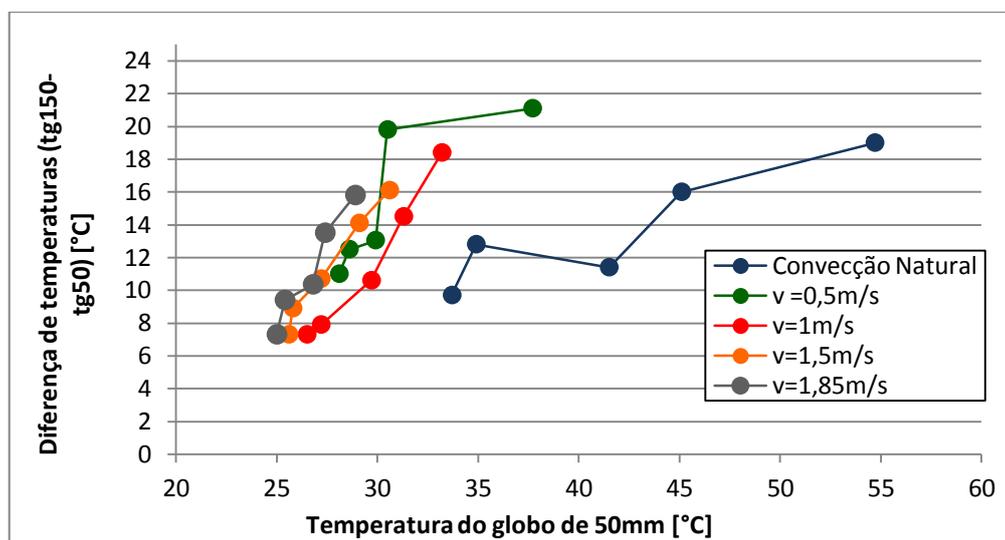


Figura 3.17. Representação gráfica da diferença de temperaturas (tg150 da Brüel-tg50)

Na Figura 3.17 está representada a diferença de temperaturas entre o globo da Brüel & Kjaer e o globo de 50mm. Podemos concluir que quanto maior for a velocidade do escoamento mais próximos estão os pontos de cada ensaio, ou seja, sempre que aumenta a velocidade do escoamento menor vai ser a diferença da temperatura entre os globos nas cinco alturas diferentes.

O mesmo se pode concluir através da Figura 3.18 que representa a diferença de temperaturas entre o globo da Testo e o globo de 50mm.

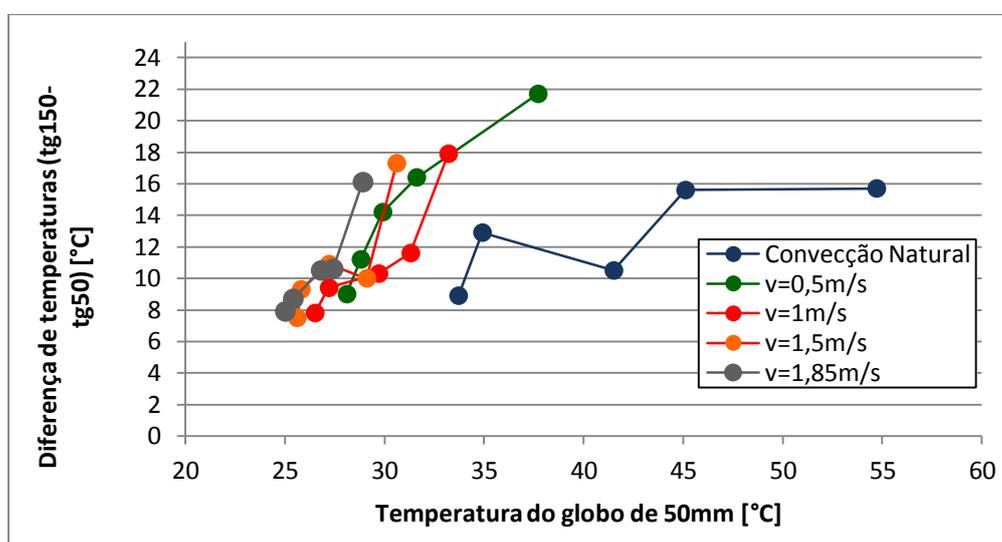


Figura 3.18. Representação gráfica da diferença de temperaturas (tg150 da Testo-tg50)

Como podemos verificar através das Figuras 3.17 e 3.18 o comportamento é praticamente o mesmo ocorrendo apenas pequenas variações ao nível das temperaturas. Por exemplo, quando a temperatura do globo de 50mm varia entre 25 e 30°C (vd. Figura 3.18) ocorre uma maior aglomeração de pontos quando esta diferença se situa entre os 7,5 e os 12°C mais ou menos, enquanto no gráfico que representa a diferença de temperaturas entre o globo da Brüel & Kjaer e o de 50mm, essa aglomeração de pontos já ocorre entre as temperaturas de 7 e 14°C.

Na Tabela 3.19 podemos ver as diferenças de temperaturas dos dois globos de 150mm e o globo de 50mm e também as diferenças entre os dois globos de 150mm. Os resultados mostram que as maiores diferenças de temperatura ocorridas entre os globos de 150mm e o de 50mm acontecem para as menores distâncias.

Tabela 3.19. – Diferenças de temperaturas

Ensaio	Distância	Diferença de Temperaturas (ΔT) [°C]		
		G. Bruel	G. Testo	G. Bruel
		-	-	-
		G. 50mm	G. 50mm	G. Testo
Convecção Natural	20 cm	19,0	15,7	3,3
	30 cm	16,0	15,6	0,4
	40 cm	11,4	10,5	0,9
	50 cm	12,8	12,9	-0,1
	60 cm	9,7	8,9	0,8
v = 0,50 m/s	20 cm	21,1	21,7	-0,6
	30 cm	18,7	16,4	2,3
	40 cm	13,1	14,2	-1,1
	50 cm	12,3	11,2	1,1
	60 cm	11,0	9,0	2,0
v = 0,94 m/s	20 cm	18,4	17,9	0,5
	30 cm	14,5	11,6	2,9
	40 cm	10,6	10,3	0,3
	50 cm	7,9	9,4	-1,5
	60 cm	7,3	7,8	-0,5
v = 1,41 m/s	20 cm	16,1	17,3	-1,2
	30 cm	14,1	10,0	4,1
	40 cm	10,7	10,9	-0,2
	50 cm	8,9	9,3	-0,4
	60 cm	7,3	7,5	-0,2
v = 1,85 m/s	20 cm	15,8	16,1	-0,3
	30 cm	13,5	10,6	2,9
	40 cm	10,4	10,5	-0,1
	50 cm	8,7	8,7	0,0
	60 cm	7,3	7,9	-0,6
Dimensão	20 cm	15,8 - 21,1	15,7 - 21,7	3,3 - (-1,2)
	30 cm	13,5 - 18,7	10,0 - 16,4	4,1 - 0,4
	40 cm	10,4 - 13,1	10,3 - 14,2	0,9 - (-1,1)
	50 cm	7,9 - 12,8	8,7 - 12,9	1,1 - (-1,5)
	60 cm	7,3 - 11,0	7,5 - 9	2,0 - (-0,6)

No caso da diferença entre o globo da Testo e o de 50mm para a menor distância, a diferença variou entre 15,7°C e 21,7°C enquanto, no caso correspondente entre o globo da Brüel & Kjaer e o de 50mm a diferença variou 15,8°C e 21,1°C. Em ambos os casos a diferença de temperaturas é muito significativa. Se a distância entre a fonte de calor e os globos aumentar, vão diminuir as temperaturas dos globos e também as diferenças entre estes.

3.5.4. Efeito da Velocidade

Nesta secção analisa-se o efeito da velocidade, tendo como base a diferença de temperaturas entre os globos de 150 e 50mm. Analisa-se a variação da temperatura para as cinco velocidades e para as cinco distâncias.

As Figuras 3.19 e 3.20 mostram a variação da diferença de temperatura em função da velocidade do ar. Estas figuras permitem obter uma perspectiva diferente das figuras anteriores.

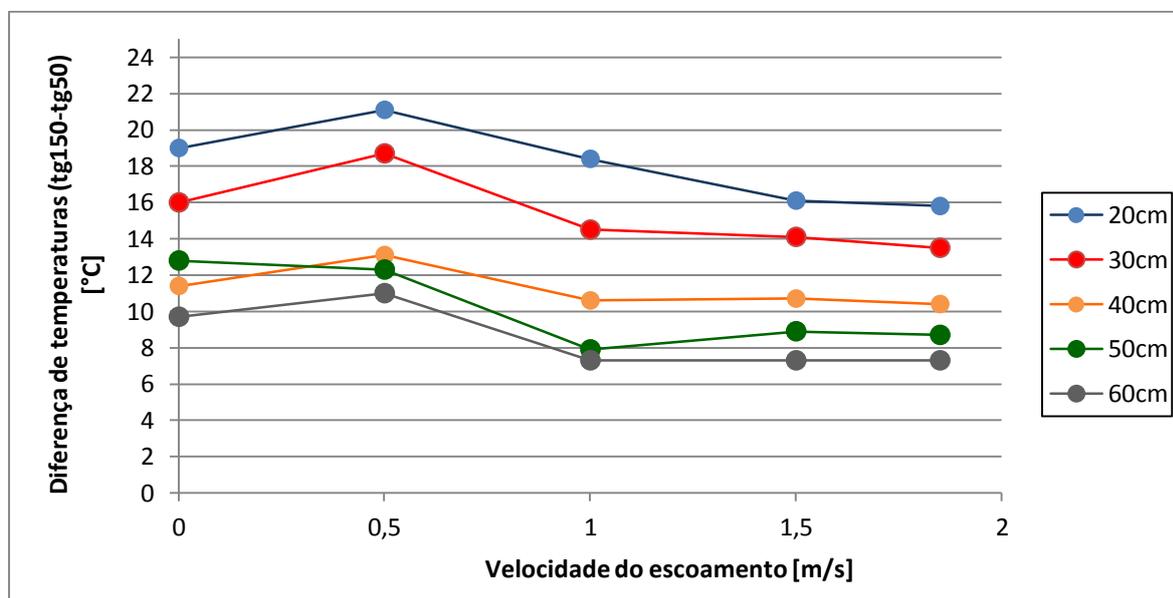


Figura 3.19. Representação gráfica da influência da velocidade do ar na diferença de temperaturas (tg150 da Bruel-tg50)

Podemos verificar que a diferença obtida entre 20 e 60 centímetros é de 9,3 ° C para convecção natural e de 8,5 ° C para a velocidade de escoamento mais elevada (1,81 m/s). No entanto a maior diferença que ocorre é para uma velocidade de escoamento de 0,94 m/s e é de 11,1 ° C.

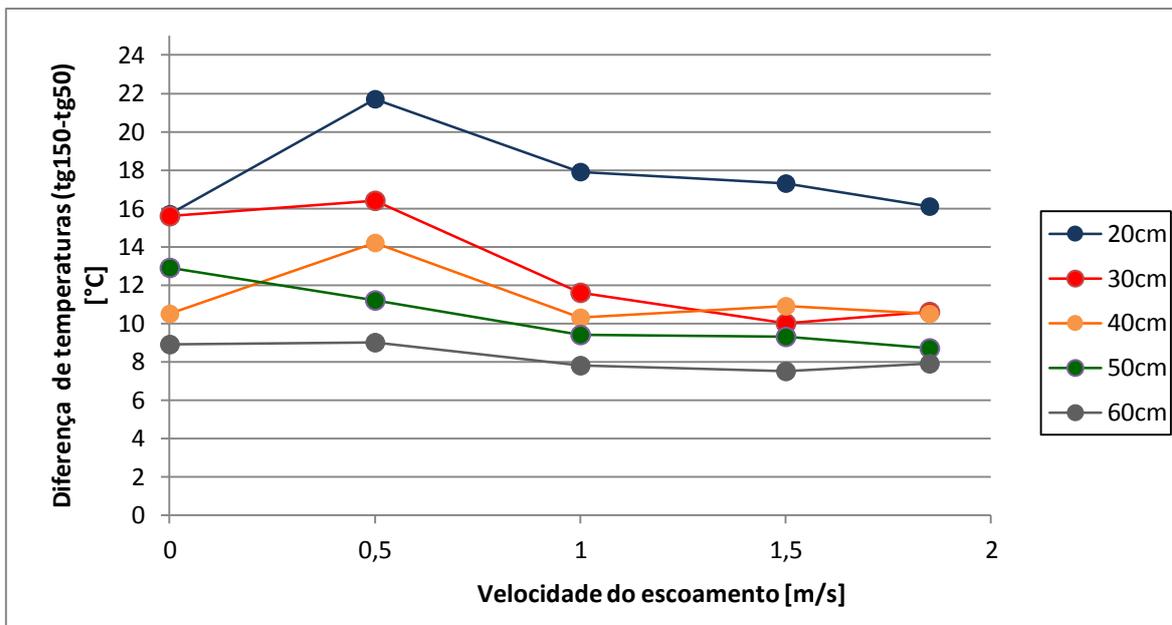


Figura 3.20. Representação gráfica da influência da velocidade do ar na diferença de temperaturas (tg150 da Testo-tg50)

No caso do globo da Testo o cenário é semelhante, obtendo também um pico para a velocidade de 0,5 m/s como na figura anterior. Neste caso a diferença máxima, ou seja a diferença máxima entre os 20 e 60cm ocorre para a velocidade de 0,5 m/s tendo esta um valor de 12,7 ° C.

Na tabela seguinte podemos observar as diferenças totais que ocorrem entre os 20 e 60 centímetros para cada velocidade e cada equipamento.

Tabela 3.20. – Diferenças de temperaturas – Efeito da velocidade

		Diferença de Temperaturas (ΔT) [°C]	
		G. Bruel	G. Testo
		G. 50mm	G. 50mm
		20 - 60 [cm]	20 - 60 [cm]
Dimensão	Convecção Natural	9,3	6,8
	v = 0,5 m/s	10,1	12,7
	v = 0,94 m/s	11,1	10,1
	v = 1,41 m/s	8,8	9,8
	v = 1,81 m/s	8,5	8,2

Como foi observado nos dois últimos gráficos, ocorre um pico para uma velocidade de 0,5 m/s em ambos os casos, e a diferença máxima entre os pontos a 20 e 60cm ocorre no primeiro caso para uma velocidade de 0,94 m/s e no segundo caso para uma velocidade de 0,5 m/s. Uma vez que é usual considerar que entre 0,0m/s e 1,0m/s se está perante um regime de transição entre convecção natural e convecção forçada, optou-se nesta dissertação por considerar separadamente os dois regimes. Assim de forma a propor uma equação de correcção da temperatura de globo medida com o sensor de 50mm na correspondente temperatura de globo padrão, sugere-se uma equação para a condição de convecção natural e outra para o caso de convecção forçada. Neste último caso não são admitidos os valores correspondentes à velocidade de 0,5 m/s pelo motivo acima referido.

Refira-se ainda que o exercício seguinte contempla apenas o caso dos resultados obtidos com o sensor de 150mm da Brüel & Kjaer. No caso de convecção natural a figura 3.21 mostra a equação de correcção proposta, sendo que cada ponto corresponde a uma distância entre o sensor e a fonte de calor.

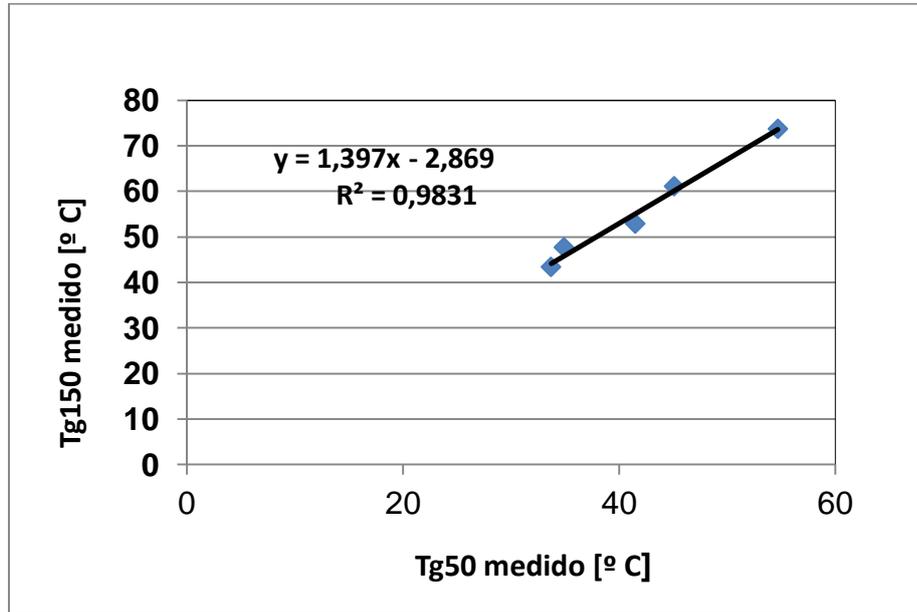


Figura 3.21. Representação gráfica e equação de conversão de Tg150 em Tg50 em convecção natural

Neste gráfico pode observar-se os cinco pontos obtidos para as respectivas cinco distâncias. Verifica-se que através de uma temperatura obtida para um globo, é possível através do gráfico obter a temperatura em convecção natural para o outro globo.

Estes dados, e a correlação entre eles, permite obter uma equação empírica para convecção natural entre o globo da Brüel & Kjaer e o globo de 50mm como é possível observar no gráfico.

Na tabela seguinte observamos as equações obtidas para este caso.

Tabela 3.21. – Equações de conversão em convecção natural

Temperatura Pretendida	Convecção Natural
Tg50 =	$0,704 \cdot Tg150 + 2,731$
Tg150 =	$1,397 \cdot Tg50 - 2,869$

No caso de convecção forçada, obteve-se o resultado ilustrado na figura 3.22 baseado em 15 pontos experimentais (cinco por cada uma das velocidades consideradas (0,94, 1,41 e 1,81 m/s)). Sublinhe-se, neste caso, que o eixo das abcissas corresponde ao produto ($v^{0,6} \cdot (T_g - T_a)$).

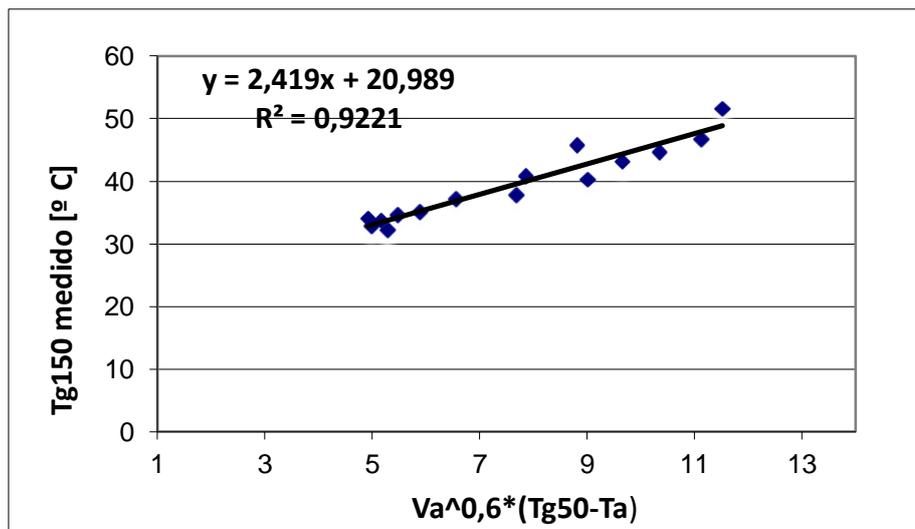


Figura 3.22. Representação gráfica e equação de conversão de Tg150 em Tg50 em convecção forçada

4. CONCLUSÕES

Actualmente, em ambientes industriais, o calor é um factor bastante importante para o bom desempenho dos trabalhadores, pois devido a este podem ocorrer situações de stresse térmico. Em condições onde a temperatura se encontra fora de certos limites, podem ocorrer acidentes de trabalho, uma vez que ultrapassando os limites da capacidade física, a concentração e desempenho dos trabalhadores é afectada, comprometendo assim a sua produtividade e a da empresa.

O índice de stresse térmico *WBGT* é influenciado pelas leituras obtidas através dos termómetros de globo negro, sendo que estes já existem há muitos anos, mas ainda hoje apresentam certas limitações.

Nesta dissertação conclui-se que existem no mercado muitos termómetros de globo, com dimensões inferiores à *standard*, e que estes se utilizados nas mesmas circunstâncias não vão apresentar os mesmos resultados. Os tempos de resposta dos globos de 150mm superam muitas vezes os 20-30 minutos admitido pela norma, e geralmente os globos de 50mm apresentam tempos de resposta inferiores a estes, o que é favorável mas acabam por fornecer temperaturas inferiores às fornecidas pelos de 150mm.

Concretamente nesta dissertação, os valores obtidos pelos termómetros da Brüel & Kjaer e Testo variaram entre, 32,3-73,7 °C e 32,9-70,4 °C respectivamente, o que representa uma diferença muito significativa para o globo de 50mm no qual as leituras de temperatura variaram entre os 25 e 54,7 °C, chegando as diferenças em casos extremos a atingirem os 21,1 °C e os 21,7 °C.

Da vasta gama de equipamentos com globos inferiores ao *standard* que existem no mercado, foram aqui caracterizados alguns, mas são muito poucos aqueles que nos dão a informação de possuírem no seu *software* uma equação de correção, para que a temperatura obtida esteja de acordo com a do globo *standard* e dessa forma também de acordo com a norma.

Procedeu-se então, através dos valores obtidos ao longo dos 75 ensaios, à obtenção de uma equação empírica de correção para dois casos distintos. No caso de convecção natural, a equação obtida foi $y = 1,3966x - 2,8687$. No caso de convecção forçada com velocidades de escoamento de 0,94 m/s, 1,41 m/s e 1,81m/s a equação obtida foi $y = 2,419x + 20,989$. Através destas duas equações é possível pela temperatura obtida por um

globo de 50mm ter a respectiva temperatura de um globo de 150mm atendendo as condições de escoamento a que estiver sujeito.

Através de medições do índice WBGT, é possível verificar as condições a que os trabalhadores estão sujeitos, tendo em conta os diversos fatores que influenciam este índice, sendo dessa forma recomendado às empresas que quantifiquem este índice nos seus postos de trabalho, mediante as atividades desenvolvidas, de modo a perceberem em que situação se encontram e se é ou não necessário aplicarem medidas corretivas ou preventivas, para melhorar assim o funcionamento das condições de trabalho, tal como a qualidade de produção e do produto, evitando riscos para a saúde.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACSM (1984) Prevention of thermal injuries during distance running. American College of Sports Medicine, Position stand. Med J August 141, 876-9.
- Ali- Toudert F, Mayer H. 2005. Outdoor thermal comfort in the old desert city of Beni-Isquen, Algeria. *Climate research* 28:243-256.
- Bernard, T. e Barrow, C. (2012), “Empirical approach to outdoor WBGT from meteorological data and performance of two different instrument designs”, *Industrial Health* 2013, 79-85
- Broome, J. (2007), “Tomar uma decisão através do raciocínio”, Em: Antunes, C.H e Dias, L.C. (eds.), *Decisão Perspectivas Interdisciplinares*, Imprensa da Universidade de Coimbra, 219-240.
- Budd GM. “How do wildland firefighters cope? Physiological and behavioural temperature regulation in men suppressing Australian summer bushfires with hand tools”. *J Therm Biol* 2001;26:381—6.
- Budd GM. “How do wildland firefighters cope? Physiological and behavioural temperature regulation in men suppressing Australian summer bushfires with hand tools. *J Therm Biol* 2001: 26: 381-6.
- Cardoso D. (2013), *Estudo de técnicas de medida utilizadas no cálculo do índice de stresse térmico WBGT*.
- Champ, D.R. e Schroeter, J. (1988), “Bacterial transport in fractured rock”, In: Olsen, B.H. & Jenkins, D. (eds.). *Proceedings of the International Conference on Water and Wastewater Microbiology*, Newport Beach, USA, 8-11 February 1988. pp. 81-87.

Fleischmann, B. (1990), “The discrete lot-sizing and scheduling problem”, *European Journal of Operational Research*, 44, 337-348.

Fredrickson, B.L. (2000, 7 de Março), “Cultivating positive emotions to optimize health and well-being. *Prevention & Treatment*”, 3, Article 0001a. Acedido a 20 de Novembro 2000

Hillier, F.S. e Lieberman, G.J. (2001), “Introduction to operations research”, 7ª Ed., Mc Graw Hill.

Hoppe P., Heat Balance modelling. *Experientia*, 1993, 49, 741-746.

[Hppt://www.logismarket.pt](http://www.logismarket.pt)

ILO(2001) Ambient factors in the workplace. International Labour Organization (ILO) codes of practice. International Labour Office, Geneva.

ISO 7243 (1989): “HOT ENVIRONMENTS” – Estimation of the heat stress on workingman, based on the WBGT-Index (wet bulbe globe temperature) “ International Standard, second edition, Genève

ISO 7726 (1998): “Ergonomics of the thermal environment – instruments for measuring physical quantities”

ISO 7730 (2005) Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort effects.

Jendritzky G., The atmospheric environment – an introduction. *Experientia* 1993, 49, 733-738.

Kerslake DMcK. The stress of hot environments. Cambridge University Press; 1972

Lemke, B. e Kjellstrom, T. (2012), “Calculating workplace WBGT from meteorological data: a tool for climate change assessment”, *Industrial Health* 2012,50,267-278

Lowara (2003), “BG Series – Self-priming centrifugal pumps”. Acedido em 24 de Novembro de 2003, em: <http://www.lowara.com>.

Mayer H., Hoppe P., Thermal conforto of man in different urban environments. *Theor. Appl. Climatol.*, 1987, 38, 43-49

NP 405-1 (1994). “Norma Portuguesa para referências bibliográficas: Documentos impressos”. Instituto Português da Qualidade, Ministério da Industria e Energia. Lisboa.

Parsons K. (2003) Human thermal environments. In: the effects of hot, moderate and cold temperatures on human health, comfort and performance. 2nd ed., Taylor & Francis, London

Parsons K. (2006) Heat Stress standard ISO 7243 and its global application. *Ind Health* 44, 368-79.

Pattloch, M., Schmidt, G., Kovaliov e M.Y. (2001), “Heuristic algorithms for lot size scheduling with application in the tobacco industry”, *Computers & Industrial Engineering*, 39, 235-253.

Silko, L.M. (1991), “The man to send rain clouds”, In: W. Brown e A. Ling (eds.), *Imagining America: Stories from the Promised Land*, Persea. New York.

Sports Medicine Australia, Policy, Preventing heat illness in sport; 2006

Thorsson, S., Lindberg, F., Eliasson, I. e Holmer, B., (2007), “Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting”, *International Journal of climatology*, 27, 1983-1993

VDI, Methods for the human-biometeorological assessment of climate and air hygiene for urban and regional planning. Part I: Climate. VDI 3787, Part II. Beuth Berlin, 1998

Wiendhal, H.P. (1995), “Load-oriented manufacturing control”, Springer, Berlin.

www.instrutemp.com

www.Scientificgear.com