

RAFAEL BRUFATTO VAGLIATTI

METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DE DISSIPACÃO DE
CALOR NO CORPO HUMANO

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Orientadores: Prof. Dr. Francis H. R. França

Porto Alegre
2010



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DE DISSIPÇÃO DE
CALOR NO CORPO HUMANO

RAFAEL BRUFATTO VAGLIATTI

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS REQUISITOS
PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
ENGENHEIRO(A) MECÂNICO(A)
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Paulo Otto Beyer
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. ADRIANE PRISCO PETRY
UFRGS / DEMEC

Prof. JORGE R. S. ZABADAL
UFRGS / DEMEC

Prof. SÉRGIO LUIZ FREY
UFRGS / DEMEC

Porto Alegre
2010

de modo especial, à minha família que sempre me deu apoio e estrutura para o meu crescimento, e à minha namorada Tânia Salvagni

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a toda minha família, em especial à minha mãe, que me ensinou os valores que levo comigo.

ao meu orientador, *Prof. Dr. Francis H. R. França* pelos conselhos, ensinamentos e disciplina.

ao *Prof. Dr. Paulo Otto Beyer* que passou parte de sua experiência, dando estrutura para o desenvolvimento do trabalho.

ao *Prof. Flávio Castro* e ao *Alex Fagundes*, que me receberam de portas abertas no laboratório, auxiliando nos experimentos.

ao amigo Mário Alberto Ungaretti, por participar do experimento, cumprindo todas as condições à risca.

ao *João Batista da Rosa*, pelo auxílio na preparação e boa-vontade para auxiliar nas dificuldades.

aos colegas e amigos, pelas idéias e bons momentos ao longo desta jornada.

Este trabalho contou com apoio das seguintes entidades:

- LETA – Laboratório de Estudos Térmicos e Aerodinâmicos (DEMEC/UFRGS)
- LAPEX – Laboratório de Pesquisa do Exercício (ESEF/UFRGS)

VAGLIATTI, R. B. **Metodologia para Medição de Dissipação de Calor no Corpo Humano**. 2010. 25f (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

RESUMO

O trabalho proposto visa à realização de uma análise das formas de dissipação de calor no corpo humano por meio de um procedimento experimental. Tal procedimento é executado com auxílio de instrumentos que determinam as condições ambientais e do corpo. As situações de interesse são de uma pessoa parada na posição vertical, caminhando e correndo em uma esteira ergométrica dentro de um laboratório. Através da quantificação da dissipação de calor e uma vez que as trocas térmicas sejam conhecidas, pode-se equacionar o balanço energético do corpo humano, assim como analisar cada forma de dissipação de calor, seu comportamento e suas incertezas. Tal procedimento atingiu uma exatidão superior a 15%.

PALAVRAS-CHAVE: Dissipação de Calor, Termorregulação, Corpo Humano, Balanço Energético

VAGLIATTI, R. B. **Methodology to Measure Heat Dissipation in Human Body**. 2010. 25f (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ABSTRACT

The objective of this study is to perform an analysis on the heat dissipation in the human body by an experimental procedure. It is executed with aid of instruments that measure environmental and body conditions. The case studies are an individual in vertical and still position, walking and running in a treadmill, in a laboratory setting. Through the quantification of the heat dissipation and the knowledge of the heat exchange, it's possible to equate the energy balance of human body and analyse every kind of heat dissipation, its behavior and uncertainties. Such procedure reached an accuracy higher than 15%.

KEYWORDS: Heat Dissipation, Thermoregulation, Human Body, Energy Balance

SUMÁRIO

ABSTRACT	7
1 - INTRODUÇÃO	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3. DISSIPACÃO DE CALOR NO CORPO HUMANO.....	11
3.1 TERMORREGULAÇÃO HUMANA.....	12
3.2 ÁREA SUPERFICIAL DO CORPO.....	12
3.3 TEMPERATURA MÉDIA RADIANTE.....	13
3.4 CALOR DISSIPADO PELA PELE.....	13
3.4.1 CALOR SENSÍVEL.....	13
3.4.2 CALOR EVAPORATIVO	13
3.5 PERDAS RESPIRATÓRIAS	14
3.6 METABOLISMO	15
3.7 COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	15
3.8 ISOLAMENTO DA VESTIMENTA.....	15
4. TÉCNICAS EXPERIMENTAIS	16
4.1 TERMOPARES	16
4.2 TERMÔMETRO DE RADIAÇÃO INFRAVERMELHA.....	16
4.3 CALORIMETRIA INDIRETA.....	16
5. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	16
5.1 APRESENTAÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL	17
5.2 CARACTERÍSTICAS FISIOLÓGICAS	18
5.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	18
5.4 TRABALHO MECÂNICO	19
6. RESULTADOS E ANÁLISES.....	20
6.1 SITUAÇÃO 1: INDIVÍDUO DE PÉ ESTÁTICO	20
6.2 SITUAÇÃO 2: INDIVÍDUO CAMINHANDO A 4,3 KM/H	22
6.3 SITUAÇÃO 2: INDIVÍDUO CORRENDO A 6,5 KM/H	23
7. CONCLUSÕES.....	23
8. REFERÊNCIAS	25
9. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	25
APENDICE A	26

APÊNDICE B.....28

1 - INTRODUÇÃO

O ser humano é homeotérmico, isto é, possui a capacidade de manter a temperatura corpórea parcialmente constante, em contraste da temperatura do ambiente que varia consideravelmente. Este balanço energético é mantido através das perdas energéticas, que anulam as gerações ou aquisições de calor.

O fenômeno que explica todo esse complexo equilíbrio se chama termorregulação. Através dela o corpo mantém sua integridade e garante o correto funcionamento de todas suas funções vitais. Além de controlar esforços involuntários para a manutenção da temperatura, ela envia sinais para o cérebro. Estes, que dizem respeito ao conforto térmico, que é “o *estado da mente que expressa satisfação com o meio térmico*” (ASHRAE, 2009).

Para um melhor entendimento do conforto térmico, de um determinado indivíduo exposto a uma situação específica, precisamos conhecer algumas condições como temperatura da pele, umidade e esforços do corpo necessários para a manutenção da temperatura, entre outros. Através de um estudo sobre a dissipação térmica é possível quantificar os fenômenos de transferência de calor envolvidos, e até mesmo qualificar o estado emocional do indivíduo, em relação ao conforto térmico.

Trabalhos preliminares estudaram peculiaridades da dissipação térmica no corpo humano. Fanger (1970) fornece informações a respeito da quantificação de trocas térmicas entre o ambientes e as pessoas. Outros modelos foram desenvolvidos, como o modelo dos dois-nós, de Gagge (1986).

O presente trabalho detalha a quantificação das trocas térmicas utilizando informações do modelo de Fanger (1970), Nishi (1981) e Rapp e Gagge (1967), validando um modelo de experimentação e fazendo a interface com os dados já obtidos em experimentações anteriores, contidos na ASHRAE e em alguns padrões ISO. Através das considerações utilizadas, os dados obtidos podem servir de base para desenvolvimento de novas tecnologias na indústria de vestimentas e até auxiliar no desenvolvimento de equipamentos de performance para o esporte, ou análise biomecânica. As situações de análise estudam o estado de conforto térmico, de acordo com as considerações de Fanger (1970).

Outros fatores não levados em conta nos métodos referenciados, dizem respeito, principalmente, a tópicos de fisiologia, que são considerados de acordo com informações fornecidas por Wahrlich e Anjos (2001).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Baseado na teoria descrita por Fanger (1970), sabe-se que o conforto térmico depende de todas as trocas energéticas existentes entre o volume de controle delimitado pelas extremidades do corpo humano e o ambiente externo. Através da equação do balanço energético proposta pelo autor pode-se mensurar os impactos de cada variável em relação às outras. Algumas correlações são demonstradas no seu estudo, além do desenvolvimento do modelo do Voto médio previsto (PMV), que estima a resposta da grande maioria de uma população quanto ao conforto térmico.

No seu modelo, Fanger leva em conta seis variáveis: nível metabólico, resistência térmica da vestimenta, temperatura do ar, temperatura média radiante, velocidade relativa do ar e pressão de vapor da água no ar ambiente. Através da interação dessas variáveis, o autor conseguiu encontrar uma relação que mede a satisfação das pessoas sobre o conforto térmico, no estado estacionário. Além destas variáveis mais três condições devem ser satisfeitas para se obter uma resposta satisfatória. Entre as hipóteses citam-se a ocorrência de trocas térmicas estáveis, a taxa de suor de suor deve estar controlada e dentro dos limites estabelecidos e a temperatura média da pele dentro dos limites padronizados, conforme o padrão 55 da ASHRAE.

Outro modelo referenciado é o modelo dos dois nós, que se trata de uma simplificação do modelo de Stolwijk e Hardy (1966). Nele divide-se o corpo em duas partes, a pele e o núcleo. A

partir destes dois pontos, com características homogêneas, e calculadas por relações definidas, estimam-se as respostas de uma população para uma situação particular. A grande particularidade do modelo é a possibilidade da sua utilização para situações transientes.

Uma grande quantidade de informações é fornecida a respeito da quantificação do cálculo das trocas térmicas. Na sua grande maioria Fanger sugere cálculos intuitivos e com certa praticidade para a aquisição das variáveis. Algumas relações são dadas por Dubois (1916), McCutchan e Taylor (1951), Chilton e Colburn (1934), Nishi (1981), McCullough e Jones (1984), Korsgaard (1949). Valores de referências podem ser consultados na ASHRAE e Fanger (1970). Estas relações referem-se a resultados satisfatórios e adotados por outros autores e pela própria ASHRAE.

3. DISSIPACÃO DE CALOR NO CORPO HUMANO

Basicamente, o corpo dissipa calor por convecção e radiação, seja através da pele ou respiração. Para ocorrer essa dissipação é preciso se ter uma fonte de energia, no caso o metabolismo, que gera energia para a dissipação e também para realizar trabalho mecânico. A Figura 3.1 esquematiza as formas presentes de trocas energéticas no corpo humano e a sua interação com o ambiente.

Todas variáveis descritas na Figura 3.1 influenciam as trocas térmicas entre o corpo humano e o ambiente. Além destes parâmetros, ocorrem fenômenos internamente no corpo humano que trazem mais incógnitas aos modelos obtidos e se baseiam, principalmente, em estudos experimentais.

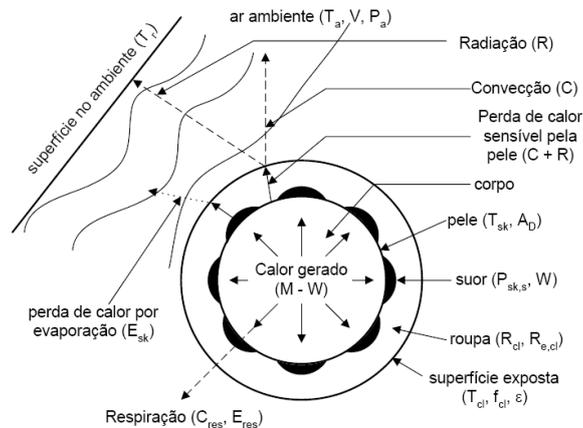


Figura 3.1. Interações térmicas do corpo com o ambiente (ASHRAE 2009)

Unindo todos os fenômenos presentes, pode-se chegar à equação do balanço energético, que é função das variáveis descritas na figura acima e é dado pela equação abaixo:

$$M - W = C + R + E_{sk} + C_{res} + E_{res} + S_{sk} + S_{cr} \quad (1)$$

onde M é calor produzido pelo metabolismo; W é o trabalho mecânico realizado; C e R são o calor sensível total perdido pela pele por convecção e radiação, respectivamente; E_{sk} é calor evaporativo total perdido pela pele; E_{res} é o calor evaporativo total perdido pela respiração; C_{res} é o calor convectivo total perdido pela respiração; S_{sk} é o calor total armazenado na pele; S_{cr} é o calor total armazenado no interior do corpo. Todos os termos da equação são dados em W/m^2 .

3.1 TERMORREGULAÇÃO HUMANA

Para se entender o fenômeno da termorregulação precisa-se relacioná-lo com um balanço energético onde o volume de trabalho é o corpo humano. Sendo mais específico, todo fluxo de calor entrando e saindo do volume implica numa mudança de temperatura, sendo esta mudança evitada pelos mecanismos de termorregulação do organismo. No caso de armazenamento de energia excessivo, o sobreaquecimento gerado é chamado de hipertermia. Em contraste, quando há uma perda excessiva de calor, ocorre o subaquecimento, ou hipotermia.

Se as temperaturas do corpo sofrerem alterações muito elevadas, a integridade física ou psicológica pode ser afetada. Por exemplo, temperaturas da pele acima de 45°C ou abaixo de 18°C causam dor. A temperatura da pele oscila em função da atividade física, ou da necessidade de perda de calor. Então, para indivíduos em atividade intensa a temperatura da pele decresce, ao passo que para atividades sedentárias se eleva. Desta forma a dissipação térmica é maximizada ou minimizada, sabendo que o fenômeno inverso da temperatura da pele ocorre no interior do corpo humano. Esta dissipação, então é função da diferença de temperatura entre a pele e o interior do corpo. Quanto maior a diferença de temperatura ocorre maior dissipação de calor, conforme a teoria da condução. (Incropera, 2006, p. 38)

O órgão humano que controla a termorregulação é o hipotálamo, que está localizado no cérebro. O seu funcionamento se dá em função de sensores de temperatura quentes ou frios, e a temperatura é avaliada por meio do sangue arterial, que passa sob este órgão. Os sinais de temperatura são recebidos também da pele e de outros locais específicos do corpo, como a espinha dorsal.

Entre os processos controlados pelo hipotálamo, o mais importante é o fluxo sanguíneo na superfície, que varia até 15 vezes para manter o equilíbrio térmico. Para um fluxo sanguíneo amplificado, tem-se uma vasodilatação, ao contrário do reduzido, onde ocorre a vasoconstrição. Esta última, que pode ser auxiliada pelo aumento da tensão muscular, aumentado a produção de calor no corpo.

Quando a vasodilatação não é suficiente, o suor auxilia neste processo, dissipando calor latente, através da evaporação. A transpiração contém sais, outro fator de controle para o processo de termorregulação. Como o sal baixa a pressão de vapor da água, ele pode dificultar a perda de calor evaporativo. Então, as concentrações de sais secretadas são controladas, afim de não aumentar a fração de pele úmida, além de evitar que o corpo perca muitos sais.

3.2 ÁREA SUPERFICIAL DO CORPO

Como as unidades dos termos da equação do balanço energético do corpo humano estão expressas em taxa por unidade de área do corpo, utiliza-se a relação proposta por DuBois (1916), que além de ser uma forma de fácil obtenção do resultado é conhecida e amplamente utilizada em procedimentos experimentais. Ela é descrita pela equação abaixo:

$$A_D = 0,202m^{0,425}l^{0,725} \quad (2)$$

onde A_D é a área de DuBois, em m^2 ; m é a massa do corpo, em kg; e l é a altura, em m.

Um fator de correção é empregado para as vestimentas presentes. Normalmente o valor do fator de correção da área da vestimenta (f_{ci}) pode ser consultado em tabelas. Alguns valores estão citados na Tabela 2 do Apêndice A.

3.3 TEMPERATURA MÉDIA RADIANTE

É definida pela temperatura de um recinto imaginário com temperatura uniforme no qual a radiação para o corpo humano é igual ao ambiente real. Para se estimar a temperatura média radiante utilizam-se valores da temperatura de globo, temperatura do ar e velocidade do ar. Para casos onde há dificuldade da mensuração das propriedades descritas, pode-se utilizar a relação de Korsgaard (1994), utilizando-se das temperaturas planas radiantes. Para pessoas na posição vertical, segue a equação abaixo:

$$\bar{t}_r = \frac{\{0,08[t_{pr}(s)+t_{pr}(i)]+0,23[t_{pr}(d)+t_{pr}(e)]+0,30[[t_{pr}(f)+t_{pr}(t)]]\}}{[2(0,18+0,22+0,30)]} \quad (3)$$

onde \bar{t}_r é a temperatura média radiante; t_{pr} é a temperatura plana radiante, e os índices s, i, d, e, f, t são as direções superior, inferior, direita, esquerda, frente e trás, respectivamente. Todas as temperaturas são dadas em °C.

3.4 CALOR DISSIPADO PELA PELE

3.4.1 CALOR SENSÍVEL

Basicamente, o calor sensível é dissipado devido a uma diferença de temperatura entre o corpo e o ambiente. Este calor é trocado por convecção e radiação. Como não é convencional se obter um valor para a temperatura da superfície externa da vestimenta, utilizam-se valores tabelados para a resistência da vestimenta R_{cl} , deixando os fluxos em função da temperatura operativa e da pele. A temperatura operativa t_o equivale a uma média ponderada pelos coeficientes radiantes e convectivos, que é fornecida pela ASHRAE e é dada pela equação abaixo:

$$t_o = \frac{h_r \bar{t}_r + h_c t_a}{h_r + h_c} \quad (4)$$

onde h_r e h_c são os coeficientes radiantes e convectivos de transferência de calor, respectivamente, dados em $W/m^2.K$; t_a é a temperatura do ar ambiente, dada em °C.

O calor sensível perdido pela pele pode ser então expresso combinando radiação e convecção, resultando na equação a seguir:

$$C + R = \frac{t_{sk} - t_o}{R_{cl} + \frac{1}{f_{cl}h}} \quad (5)$$

onde $C + R$ é o calor sensível perdido pela pele, dado em W/m^2 ; t_{sk} é a temperatura da pele, em °C; R_{cl} é a resistência total das vestimentas, em $(m^2.K)/W$; f_{cl} é o fator de correção da área do corpo pela vestimenta, adimensional; e h é o coeficiente total de transferência de calor, que equivale à soma dos coeficientes h_r e h_c .

3.4.2 CALOR EVAPORATIVO

Os principais fatores que quantificam a perda de calor evaporativo da pele são a umidade da pele e a diferença entre a pressão de vapor da água na pele e no ambiente. Como esta perda engloba o suor secretado mais a difusão natural da água pela pele, uma alternativa possível para estimá-lo é a utilização da taxa de suor. Esta é uma medida difícil de ser tomada e, portanto, é mais conveniente

se utilizar da resistência do calor evaporativo da vestimenta $R_{e,cl}$, que é outro valor tabelado. Várias formulações são dadas pelos autores, porém a equação da ASHRAE permite a solução de forma mais simples que resulta na equação dada abaixo:

$$E_{sk} = \frac{w(p_{sk,s} - p_a)}{R_{e,cl} + \frac{1}{f_{cl} h_e}} \quad (6)$$

onde w é a fração de pele úmida, adimensional; $p_{sk,s}$ é a pressão de vapor da água na pele, em kPa ; p_a é a pressão de vapor da água no ar ambiente, em kPa ; h_e é o coeficiente de transferência de calor evaporativo, expresso em $W/(m^2.kPa)$; e $R_{e,cl}$ é a resistência do calor evaporativo da vestimenta, que é um valor tabelado, e está expresso em $(m^2.kPa)/W$.

Para o cálculo da fração de pele úmida, w , utiliza-se o valor de 0,06 para a ausência de suor, que é causado pela difusão. Para a ocorrência de suor, deve-se calcular a relação de pele molhada em relação à pele total. Para esta relação pondera-se o valor de pele úmida somada ao valor de pele seca multiplicado pelo termo 0,06. Esta relação é fornecida pela ASHRAE e dada pela equação abaixo:

$$w = w_{rsw} + 0,06(1 - w_{rsw}) \quad (7)$$

onde w_{rsw} é a porção da pele coberta por suor, variando de 0 a 1, e adimensional.

3.5 PERDAS RESPIRATÓRIAS

O calor perdido pela respiração é trocado na forma convectiva e evaporativa. Uma consideração feita é que o ar é inspirado nas condições ambientais e expirado aproximadamente saturado e com a temperatura interna do corpo. Conhecendo-se estes parâmetros e aplicando a equação do balanço de energia para este caso específico tem-se a equação:

$$C_{res} + E_{res} = \frac{(h_{ex} - h_a) \dot{m}_{res}}{A_D} \quad (8)$$

onde h_{ex} e h_a são as entalpias do ar expirado e inspirado, respectivamente, expressas em J/kg (ar seco) ; e \dot{m}_{res} é a taxa de ventilação pulmonar, em kg/s.

Para ambientes comuns e internos (McCutchan e Taylor, 1951) a temperatura e umidade do ar expirado podem ser estimadas em função das condições do ambiente. A temperatura e umidade do ar expirado são dadas pelas seguintes equações:

$$t_{ex} = 32,6 + 0,066.t_a + 32.W_a \quad (9)$$

$$W_{ex} = 0,0277 + 0,000065.t_a + 0,2.W_a \quad (10)$$

onde t_{ex} , que é a tempera do ar expirado, e t_a são dados em °C; e W_{ex} e W_a são as umidades do ar expirado e ar ambiente, respectivamente, dados em $kg_{\text{água}}/kg_{\text{ar seco}}$.

Por fim, os valores de C_{res} e E_{res} podem ser calculados, uma vez que se estima a taxa de ventilação pulmonar através do metabolismo, consideração feita pela teoria de Fanger (1970). A equação referenciada é dada abaixo:

$$\dot{m}_{res} = 1,43.10^{-6}.M.A_D \quad (11)$$

3.6 METABOLISMO

Para a maioria das aplicações o metabolismo é extraído de tabelas. Porém, quando ele precisa ser medido de forma mais precisa, podem-se realizar experimentos fisiológicos. Uma equação empírica para a taxa metabólica é dada por Nishi (1981) e representada pela equação a seguir:

$$M = \frac{21(0,23RQ+0,77)Q_{O_2}}{A_D} \quad (12)$$

onde RQ é o quociente respiratório, ou taxa de CO_2 expirada dividida pela taxa de O_2 inspirada, adimensional ; e Q_{O_2} é a taxa volumétrica de oxigênio, dada em mL/s, nas condições atmosféricas padrão.

3.7 COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Para a solução das equações de dissipação de calor no corpo humano, é necessária a utilização dos coeficientes de transferência de calor, por convecção, radiação e evaporação.

O valor mais recomendado para o coeficiente radiativo (h_r) é igual a $4,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, a não ser que se tenham emissividades muito baixas ou materiais refletivos, o que exige uma correção para este coeficiente.

Para o coeficiente convectivo de transferência de calor utilizam-se tabelas para as condições convenientes. Este coeficiente é necessário para a determinação da temperatura operativa e das propriedades das vestimentas, entre outros parâmetros. A tabela 1 do APÊNDICE A mostra os valores para alguns casos mais comuns estudados, detalhados para pressão atmosférica. Para pressões diferentes da atmosférica padrão se torna necessária uma correção do coeficiente ou um estudo complementar.

Por fim, é necessário estimar o coeficiente evaporativo, podendo assim detalhar todas as formas de dissipação de calor. Este coeficiente é dado pela relação de Lewis, dada abaixo:

$$RL = \frac{he}{hc} \quad (14)$$

onde RL é dado em K/kPa e para ambientes fechados é estimada pelo valor de $16,5 \text{ K}/\text{kPa}$.

3.8 ISOLAMENTO DA VESTIMENTA

Os métodos mais precisos de determinar o isolamento são através da utilização de manequins aquecidos e de indivíduos ativos. Por meio destas medições pode-se determinar a resistência térmica da vestimenta total, partindo da idéia de que o manequim só dissipa calor sensível ($C + R$). Devido à dificuldade da determinação das resistências foram geradas tabelas com alguns dados comuns. A Tabela 2 do APÊNDICE A, de McCullough e Jones (1984), cita alguns valores para situações com ambientes fechados. Sua incerteza pode chegar a até 20%.

Os valores do isolamento são expressos em clo, expresso pelo símbolo I . A relação entre esta unidade e a unidade padrão, $\text{K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$, é dada pela abaixo:

$$R = 0,155 I \quad (15)$$

4. TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

4.1 TERMOPARES

Os termopares são dispositivos elétricos utilizados na medição de temperatura. Dentre as vantagens que justificam sua utilização há o fator econômico e a grande faixa de temperaturas de trabalho. Porém a exatidão deles é um empecilho, fato que exige a sua calibração para casos onde se quer uma grande precisão.

O sensor é composto de dois fios, de materiais metálicos distintos, unidos por soldas ou pelo simples contato na extremidade quente, ou junta quente. Quando submetido a uma diferença de temperatura, esta configuração gera uma força eletromotriz. Tal efeito é conhecido como “Seebeck”. A tensão gerada pelos fios pode ser facilmente mensurada por multímetros e é dependente dos materiais utilizados, que classificam os termopares em tipo J, K, T e R, entre outros.

Caso o valor de interesse seja uma diferença de temperatura, o termopar já retorna o valor real. Porém, em caso de medição de uma temperatura é preciso conhecer a temperatura da junta fria, ou seja, a junta que está ligada o aparelho de medição.

4.2 TERMÔMETRO DE RADIAÇÃO INFRAVERMELHA

São conhecidos também como pirômetros e têm uma grande vantagem, pois possibilitam a medição de temperaturas sem contato e com para uma ampla faixa de valores. Eles funcionam através de uma mudança numa propriedade elétrica, que é causada pela absorção de fótons no sensor.

A qualidade da medição, ou precisão é mais complexa de ser atingida, em comparação com os termopares, pois é preciso conhecimento da emissividade das superfícies envolvidas, tanto que é um parâmetro a ser inserido no medidor. Outro fator que deve ser levado em conta é à distância do sensor a superfície, uma vez que ele possui um ângulo que vai abranger uma determinada área da superfície de medição. Este ângulo é fornecido pelo fabricante, e muitas vezes é dado em função da relação da distância ao ponto de interesse e o raio de medição.

4.3 CALORIMETRIA INDIRETA

Através desta metodologia é possível determinar o valor do metabolismo. Ela se baseia na hipótese de que toda energia química produzida no organismo é proveniente da oxidação dos carboidratos, proteínas e gorduras e foi estudada por Green, em 1994(apud Wahrlich e Anjos, 2001).

Para aplicações práticas desta podem-se utilizar relações de metabolismo em função das vazões de O_2 e CO_2 envolvidas na respiração. O tempo do experimento deve garantir que a variação do metabolismo entre medições distanciadas por 5 minutos seja menor que 10%. Segundo Fonseca (2007), os tempos mínimos estabelecidos chegam ao máximo à faixa de 25 minutos. A incerteza chega até 5%, segundo o padrão ISO 8996.

5. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

O experimento busca o detalhamento da dissipação de calor no corpo humano e reproduz uma situação em ambiente fechado, pois além da bibliografia presente ser rica em dados para este tipo de situação, algumas incertezas referentes à radiação e condições ambientais são minimizadas.

O indivíduo estudado é uma pessoa de fisionomia magra, com altura e peso médios, iguais a 74,7 kg e 1,734m, respectivamente. Ele estará submetido a três situações distintas: repouso na posição ortostática vertical, caminhando em intensidade leve (4,3 km/h) e correndo numa intensidade baixa (6,5 km/h), em uma esteira ergométrica. Os experimentos serão realizados com vestimenta normal e utilizar-se-á de valores tabelados para a sua resistência térmica, conforme dado pela Tabela 2 do Apêndice. A vestimenta em estudo corresponde a uma combinação de calção, meia, tênis, cueca e camiseta, e a uma resistência de 0,36 clo. Seu fator de correção de área, f_{cl} , equivale a 1,1.

O modelo utilizado relaciona informações do corpo humano com as condições ambientais em estado estacionário, ou seja, o corpo humano se comporta da mesma forma ao longo do tempo, se falando de dissipação térmica e possui a mesma distribuição de temperatura nos pontos de interesse. Também, pode-se comprovar este estado através dos batimentos cardíacos e do metabolismo estabilizados. Desta forma podem-se negligenciar os termos de calor armazenado na pele e no interior do corpo, S_{sk} e S_{cr} , respectivamente.

A Figura 5.1 apresenta uma ilustração do experimento, onde destaca-se a presença do analisador de gases, ao lado esquerdo do indivíduo; a unidade de aquisição de dados, ao lado direito; e a presença dos termopares posicionados em posições estratégicas.



Figura 5.1. Experimento sendo realizado.

5.1 APRESENTAÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

Entre os equipamentos necessários para a medição completa da dissipação de calor foram utilizados termopares, um termo-higrômetro, um pirômetro, além de dois equipamentos imprescindíveis, que são o analisador de gases e uma unidade de aquisição de dados. Além destes medidores, foi utilizado o espaço do LAPEX, que possui toda infra-estrutura para experimentos desta natureza. Para um caso de controle mais específico também poderia ser utilizada a câmara ambiental do laboratório.

A aquisição de dados foi realizada pelo equipamento da marca Agilent e modelo 3497A. Ele tem uma resolução de 5 dígitos e $\frac{1}{2}$, e pode ser ajustado para fazer a aquisição conforme o tempo de interesse para o experimento, que no caso foi de 5 segundos. As medições de temperatura são executadas diretamente pelo aparelho, somando a temperatura ambiente com as diferenças do termopar. Após a coleta de dados, pode ser realizada a interface com um computador convencional, permitindo uma melhor análise dos dados.

Com relação à seleção dos termopares, ela teve influência pela faixa de temperaturas e também pela disponibilidade de material. Para sua fixação foram utilizados eletrodos de eletrocardiograma, que possuem grande adesividade, além de um esparadrapo sobreposto. O termopar tipo J se aplica de forma satisfatória para o experimento, possuindo uma incerteza de 0,1°C. Tal precisão é garantida por meio da calibração dos sensores com o auxílio de um PT-100 padrão, que tem a incerteza igual a 0,1°C. As curvas de calibração garantiram grande exatidão e foi utilizado um banho térmico para realizá-la. A faixa para a qual foi feito o procedimento foi de 20 a 40°C, abrangendo todas as temperaturas envolvidas no experimento.

Plotando as temperaturas do PT-100 e do termopar juntamente é possível encontrar a equação da calibração do termopar. Um gráfico com as temperaturas de cada termopar no eixo X e do PT-100 no eixo Y foi gerado. A partir destes dados foram obtidas as equações para a temperatura. Estas equações foram inseridas no Agilent. O exemplo da calibração do Termopar 1 está descrita no APÊNDICE B, assim como todas as equações dos demais.

O analisador de gases utilizado é responsável pela obtenção das vazões de O₂ inspirado e CO₂ expirado. A partir destes dados pode-se estimar o metabolismo. O equipamento tem interface com um computador, e envia dados para registrar o histórico das medições. Toda medição de metabolismo serve para se obter o seu valor médio, que ao contrário do valor instantâneo, é utilizado em estudo realizado por Fonseca (2007), além de aplicações práticas laboratoriais.

A medição da temperatura plana radiante foi obtida com a utilização do pirômetro da marca Raytek. O modelo utilizado foi o Raynger ST60 ProPlus. As especificações do fabricante garantem medições de -32 até 760°C. Quanto à precisão, para temperaturas menores que 23°C tem-se 2°C de precisão, enquanto que para temperatura maiores de 23°C tem-se 1°C de precisão.

O modelo do termo-higrômetro utilizado foi o MT-241, fabricado pela Minipa, que é de fácil obtenção e utilização pessoal. Tem a capacidade de medir umidade relativa do ar e temperatura em 2 pontos diferentes. Segundo o fabricante, para as faixas utilizadas tem-se uma precisão de 5% para a umidade relativa.

5.2 CARACTERÍSTICAS FISIOLÓGICAS

Algumas considerações devem ser feitas a respeito das condições do indivíduo a ser estudado, a fim de determinar o seu metabolismo. Para as medições serem realizadas da forma mais precisa, fatores como alimentação, sono e atividade física prévia devem ser controlados.

A respeito da alimentação, um estudo realizado por Bursztein (1989, apud Wahrlich e Anjos, 2001), conclui que qualquer ingestão de alimentos ocorrida antes de 12 horas da medição não geram nenhum impacto ou desequilíbrio no metabolismo. Também a aquisição dos dados deve ocorrer logo após o indivíduo acordar. Então para a medição toma-se o cuidado de respeitar este tempo de jejum, e realizando o experimento matinal.

O histórico da atividade física realizado previamente também influencia nos resultados. Para isso, uma ausência de 24 horas deve haver em relação a exercícios físicos moderados ou pesados, de acordo com estudos de Wilmore (1998, apud Wahrlich e Anjos, 2001).

5.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Para se medir os fluxos de calor, são necessárias temperaturas da pele obtidas através da aquisição de dados por termopares. Com estes dados pode-se chegar a uma temperatura média equivalente a toda área superficial do corpo. Também é de interesse conhecer a pressão de vapor da água na temperatura da pele, $p_{sk,s}$, que é considerada saturada, a fração de pele úmida, que é estimada através da relação área molhada da pele.

Os valores para medição da temperatura média radiante e temperatura do ar são de 3 minutos com no mínimo 18 medições igualmente espaçadas no tempo. Para cada medição é considerada a média do valor (Standard 55, ASHRAE). A emissividade, que influencia na radiação, será considerada constante e igual a 0,95, o que é considerado satisfatório para medições do corpo humano, conforme Flesch (apud Schumacher, 2002). As medições da temperatura média radiante são obtidas através da obtenção das temperaturas médias das paredes ou obstáculos posicionados nas 6 direções perpendiculares ao corpo estudado, ao passo que a temperatura do ar é medida nas alturas de 0,1m, 1,1m e 1,7m para uma pessoa que se encontra na posição vertical. Os pontos de medição da temperatura da pele são referenciados na norma ASTM 1921-90 e estão representados na Figura 5.3.1.

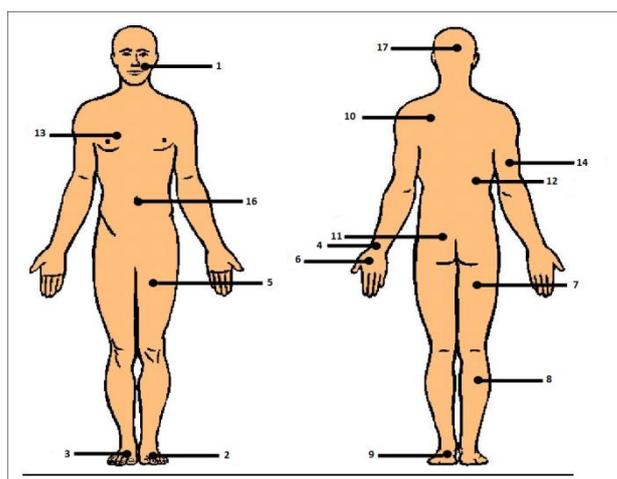


Figura 5.3.1. Disposição dos termopares. (Fonte: Schumacher 2009)

Para uma melhor repetibilidade do experimento foram determinadas posições referentes a partes do corpo humano. Cada ponto está identificado na Tabela 2, do APÊNDICE B, sendo os mesmos pontos aos ilustrados na Figura 5.3.1.

Além do estado corpóreo, temperatura do ar e temperatura média radiante deve-se conhecer mais algum dado adicional do ar ambiente, a fim de determinar todas suas propriedades. Para o experimento é usada a umidade relativa (UR). A fim de aumentar a precisão do higrômetro optou-se por utilizar uma umidade relativa do ar de perto do 60% e uma temperatura próxima à faixa de 20°C a 30°C, conforme dados obtidos no manual do fornecedor. A partir destes dados é possível determinar outras propriedades do ar, uma vez que são propriedades intensivas. Entre elas estão a pressão de vapor da água do ar ambiente, p_a , e a entalpia do ar ambiente, h_a . Estes dados podem ser obtidos em uma carta psicrométrica.

5.4 TRABALHO MECÂNICO

Segundo valores encontrados em tabelas (FANGER, 1970), encontram-se valores de trabalho mecânico externo nulo, para os casos onde há um deslocamento do indivíduo sem desnível do terreno. Esta conclusão é utilizada, devido a não haver realização de trabalho de um ponto de vista físico.

6. RESULTADOS E ANÁLISES

Para os três casos estudados foram utilizadas propriedades ou variáveis comuns, ou dependentes do ambiente no instante em que foi realizado. As propriedades da vestimenta, por exemplo, mantiveram-se constantes. O mesmo ocorre para o coeficiente radiativo de transferência de calor, que foi considerado igual a $4,7 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Por outro lado, o coeficiente convectivo sofre mudanças. Apesar de não haver velocidade significativa do ar no laboratório e esta ser ignorada, há influência do movimento do indivíduo, e trata-se deste coeficiente separadamente em cada caso.

A temperatura do ar, a temperatura média radiante e o metabolismo também serão tratados em cada caso, pois como se fez a aquisição, foram feitas médias aritméticas para determinar seu valor. Para a temperatura do ar foi feita uma média dos valores obtidos pelos termopares, que permaneceu praticamente constante. Já para a temperatura média radiante utilizou-se o pirômetro fazendo medições para as seis direções citadas por Korsgaard (1994). Como o pirômetro tem uma relação de 30 vezes a área da medição em relação à distância, garante-se a média da parede de interesse para as laterais, que estão a 4 metros do indivíduo e para a superfície superior e inferior.

Pelo método de aquisição de dados obteve-se a curva de temperaturas para todos os pontos de medição do corpo. Um exemplo é a curva da parte posterior da coxa, que é uma das mais solicitadas partes do corpo exercendo o movimento. Ela está representada na Figura 2 do APÊNDICE B.

Seguindo os conceitos da termorregulação nota-se que no primeiro caso as temperaturas se mantiveram estáveis, reduzindo a necessidade de auxílio do organismo para buscar o equilíbrio. Segundo a ASHRAE (2009), se algum exercício for executado e não houver suor secretado, como ocorre no Caso 2, a temperatura da pele tende a cair. Comprovado pela Figura 2 do APÊNDICE B, nota-se uma temperatura de aproximadamente 1°C inferior do indivíduo caminhando a $4,3 \text{ km/h}$ em relação do indivíduo em pé. Para terceiro caso, obtém-se uma temperatura superior da parte posterior da coxa, que pode ser justificada pelo fato do suor estar sendo evaporado e minimizando a dissipação sensível da pele para o ambiente.

Para validação do experimento utilizou-se os valores da Eq. (1) e calculando um erro relativo ao balanço, resultando em:

$$\text{Erro relativo} = \frac{M-W-C-R-E_{sk}-C_{res}-E_{res}}{\frac{(M-W+C+R+E_{sk}+C_{res}+E_{res})}{2}} \cdot 100 \quad (16)$$

onde o *Erro relativo* é expresso em %, e engloba todos erros presentes no experimento em um único índice.

6.1 SITUAÇÃO 1: INDIVÍDUO DE PÉ ESTÁTICO

Primeiramente, determinando as propriedades do ar ambiente, foram obtidos temperaturas de $18,8^\circ\text{C}$ para o ar ambiente e $18,8^\circ\text{C}$ para a temperatura média radiante. A partir da umidade do ar, que teve uma média de 72%, foram obtidas outras propriedades de interesse através da carta psicrométrica. Foram encontrados valores de entalpia igual a 4377 J/kg para a entalpia, umidade absoluta igual a $0,00978 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$ e uma pressão de vapor da água de $1,5686 \text{ kPa}$. Para a pele, estima-se a pressão de vapor da água saturada e igual a $4,4298 \text{ kPa}$.

O coeficiente convectivo é retirado da Tabela 1 do Apêndice A e equivale a $4 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Em consequência, o coeficiente evaporativo é 16,5 vezes maior e igual a $66 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.

Para estimar a evaporação de calor pela pele deve ser estimada a relação de área de pele úmida. Uma vez que o indivíduo não suou, considerou-se a fração de pele úmida como 0,06, que é o valor referente a difusão da água pela pele.

Utilizando as Eq. (9) e (10), foi determinada a temperatura e a umidade do ar expirado pelo indivíduo. Tendo os dados obtidos para o primeiro caso, podem-se estimar as trocas térmicas envolvidas no processo.

A partir da Eq. (6) é calculado o calor de evaporação pela pele, que é constante devido às condições ambientais não variarem. Já para o calor dissipado pela respiração tem-se uma parcela evaporativa e outra convectiva, que são determinadas em função da entalpia e vazão pulmonar, e são dadas pela Eq. (8). Por fim determina-se a energia perdida por convecção e radiação pela pele por meio da Eq. (5). Tendo estes valores é possível determinar todo calor perdido pelo corpo humano, e como não há trabalho mecânico externo, teoricamente este valor é igual ao metabolismo.

A Tabela 6.1.1 dá os valores determinados para o tempo de 20 minutos. O erro relativo estabelecido para a medição de incertezas é dado pela diferença entre o metabolismo e a dissipação total de calor, dividida pela média entre a soma dos lados da Eq. (1). Uma análise de incerteza mais qualitativa é comentada nas conclusões. Para o primeiro caso não se podem estabelecer erros para a equação, pois o conforto térmico não está estabelecido.

Tabela 6.1.1. Resultados para o indivíduo de pé.

Tempo	20 minutos
Temperatura da pele	30,7 °C
Metabolismo médio	43,2 W/m ²
Temperatura operativa	18,8 °C
Vazão pulmonar	0,00011622 kg/s
Calor evaporativo dissipado pela pele	7,40 W/m ²
Calor dissipado pela respiração	4,30 W/m ²
Energia sensível perdida pela pele	74,11 W/m ²
Diferença no balanço	42,66 W/m ²

A Figura 6.1.1 mostra a quantidade de energia sendo dissipada além da produzida, ou seja, o calor que o corpo está perdendo ao longo do tempo.

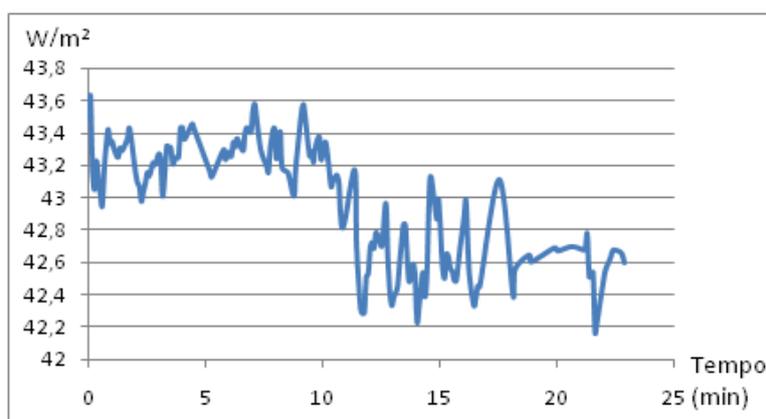


Figura 6.1.1. Diferença no balanço energético no tempo.

Conforme dados da ASHRAE, seguindo o modelo do PMV de Fanger (1970), há uma faixa de temperatura e umidade onde ocorre o conforto térmico. A Figura 1 do APÊNDICE A mostra os valores aceitáveis de conforto. Através destes dados, para a umidade relativa e a resistência térmica da vestimenta no primeiro caso, é requerida uma temperatura operativa mínima de 24°C para o conforto térmico. Uma temperatura operativa menor faz com que a temperatura média da pele decresça aquém da temperatura normal em condições de conforto. Em situações normais a

temperatura da pele média deve oscilar entre 33 e 34°C, conforme Fanger (1970). Como a temperatura da pele estava na faixa dos 30,7°C, isto caracterizou um estado de hipotermia, o que resulta num gradiente de temperatura maior entre o núcleo e a superfície do corpo e diminuiu o gradiente entre a superfície e o ambiente. Este fenômeno fez com que menos energia flua do corpo para o ambiente, mesmo assim ocorrendo um déficit (diferença no balanço).

6.2 SITUAÇÃO 2: INDIVÍDUO CAMINHANDO A 4,3 KM/H

Para o segundo caso, realizou-se a medição de forma contínua, partindo o movimento da esteira ergométrica. As condições ambientais médias para o experimento foram de 19,2°C para a temperatura ambiente, com variação de 1°C; 19,6°C para a temperatura média radiante, com variação de 0,5°C; e uma umidade relativa de 69%. O restante das propriedades foi obtido da mesma forma que no primeiro caso, porém com uma alteração no coeficiente convectivo. Ele foi obtido da Tabela 1 do Apêndice A e resultou num valor de 6,916 W/(m².K). Conforme citado no primeiro caso, o indivíduo não suou.

O erro relativo determinado para a situação atingiu no máximo 4,25%, tendo uma média de 1,41%. Na Tabela 6.2.1 seguem resultados para o instante de 20,6 minutos.

Tabela 6.2.1. Resultados para o indivíduo a 4,3 km/h.

Tempo	20,6 minutos
Temperatura da pele	32,1 °C
Metabolismo	115,189 W/m ²
Temperatura operativa	19,3 °C
Vazão pulmonar	0,00031 kg/s
Calor dissipado pela respiração	10,47 W/m ²
Calor evaporativo dissipado pela pele	11,04 W/m ²
Energia sensível perdida pela pele	95,27 W/m ²
Diferença no balanço	1,60 W/m ²
Erro relativo	1,38%

Para o segundo caso foram atingidos erros relativamente pequenos, que são mostrados na Figura 6.2.1.

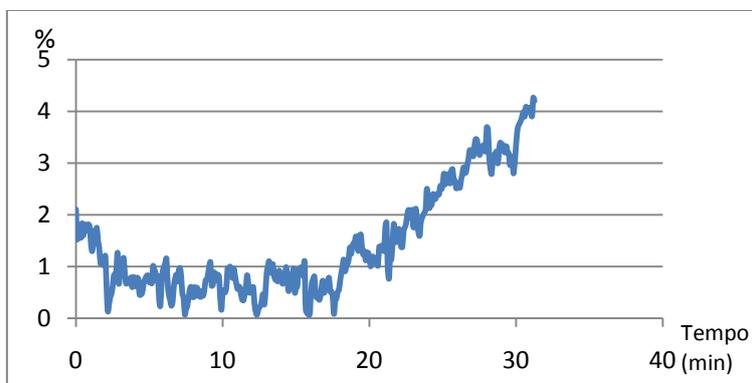


Figura 6.2.1. Erro relativo ao segundo caso no tempo.

6.3 SITUAÇÃO 3: INDIVÍDUO CORRENDO A 6,5 KM/H

Assim como no segundo caso, a velocidade da esteira foi elevada para 6,5 km/h, iniciando assim a aquisição de dados. Obteve-se uma temperatura ambiente média de 20,3°C, variando 1,3°C ao longo da medição; uma temperatura média radiante de 19,9°C, com variação de 0,2°C; e uma umidade relativa de 63%. A mesma relação foi utilizada para o cálculo do coeficiente convectivo, resultando em 8,126 W/(m².K).

A particularidade do terceiro experimento foi a ocorrência de suor compensatório. Para o cálculo da fração de pele úmida estimou-se uma relação de áreas partindo das partes molhadas. As áreas molhadas no momento eram costas, peito, coxas, parte posterior da cabeça e pés. Partindo da equação 8 chegou-se a uma fração de pele úmida de 0,4558.

A tabela 6.3.1 mostra resultados do instante de 23,5 minutos.

Tabela 6.3.1. Resultados para o indivíduo a 6,5 km/h.

Tempo	23,5 minutos
Temperatura da pele	34,5°C
Metabolismo	313,48 W/m ²
Temperatura operativa	20,2°C
Vazão pulmonar	0,000844 kg/s
Calor dissipado pela respiração	28,51 W/m ²
Calor evaporativo dissipado pela pele	106,94 W/m ²
Energia sensível perdida pela pele	112,79 W/m ²
Diferença no balanço	65,23 W/m ²
Erro relativo	11,61%

A Figura 6.3.1 mostra o erro relativo para cada momento do experimento.

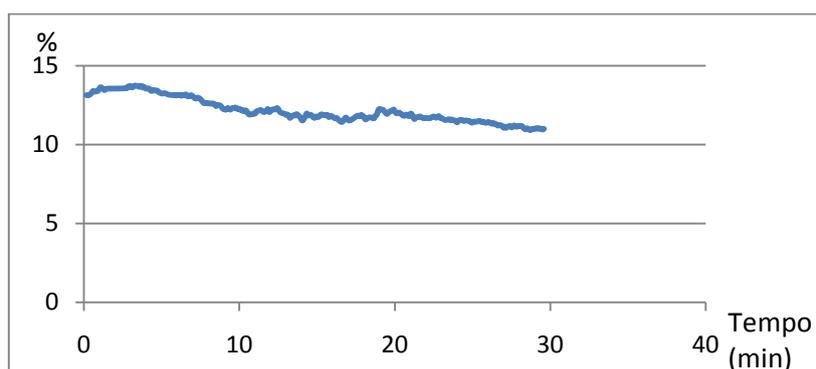


Figura 6.3.1. Erro relativo ao terceiro caso no tempo.

7. CONCLUSÕES

Conforme as teorias referenciadas no trabalho, foram obtidos resultados satisfatórios e conclusivos. Apesar da grande quantidade de incertezas envolvidas no trabalho, como temperaturas, fração de pele úmida, temperatura e umidade do ar expirado, equações empíricas e metabolismo, as

informações coletadas serviram de base para confirmar todos os conceitos já conhecidos sobre a termorregulação.

Uma consideração a ser feita é sobre a equação do balanço energético do corpo humano e as condições de conforto térmico. Apesar do conforto térmico não ser o foco do trabalho, ele influenciou nos resultados de maneira considerável, conforme evidenciado pela diferença no balanço do primeiro caso.

Para os valores de metabolismo, se comparou os dados obtidos com os valores tabelados na ASHRAE (2009). Conforme mostrado, o indivíduo apresentou um metabolismo mais lento que os valores propostos na bibliografia. Apesar da incerteza da medição metabólica, que é de até 5%, uma idéia equivocada seria causada se o valor fosse extraído de tabelas. Desta forma, teríamos mais incertezas nas medições e resultados não confiáveis, uma vez que o metabolismo é uma característica particular para cada pessoa. Para os dois primeiros casos o metabolismo medido é menor que o metabolismo tabelado. Já no terceiro caso o metabolismo está mais alto que o tabelado devido à natureza do exercício, que nos dados bibliográficos referem a uma pessoa caminhando e no trabalho o exercício foi uma corrida leve.

Outra importante consideração que concorda com a teoria, mostra que os pontos que estão exercendo um trabalho interno devem dissipar mais calor. Para que isso ocorra devem reduzir sua temperatura durante o experimento, em caso de pele seca. Por outro lado, quando o calor necessário não consegue ser dissipado, há ocorrência de suor, e a temperatura da pele aumenta, pois a água dissipa uma parcela da energia, na forma de calor latente.

Focando no objetivo do trabalho, a Tabela 3 do APÊNDICE B especifica a temperatura média da pele para cada ponto medido e para os três casos. Tais valores podem ser úteis para a indústria têxtil ou até mesmo de climatização, para desenvolvimento de novas tecnologias. Também podem ser utilizadas para o estudo dos movimentos em diversos esportes, onde se quer a mínima dissipação de energia para a melhor eficiência mecânica. A partir destes dados fica evidenciado o acréscimo de temperatura em pontos que realizam trabalho, que é o caso da coxa; ou que possuem alta resistência térmica, como o pé ou o calcanhar. Também, comparando os dados do primeiro e segundo caso, fica clara a influência das condições ambientais, alterando a temperatura média da pele conforme o estado de conforto térmico.

A partir de uma situação bem conhecida, como foi a experimentada, para uma atividade comum e bastante estudada, que é a corrida e a caminhada, foi possível desenvolver uma forma de obter o equilíbrio energético. A partir dos conhecimentos tratados, pode-se adaptar a situação a outras atividades de interesse, e qualquer resultado deste trabalho é relativo às situações comentadas.

Apesar dos resultados terem permitido a execução de uma rica análise, muitos pontos podem ser desenvolvidos. Estas sugestões garantem mais confiabilidade e entre elas pode-se citar a utilização de métodos fotográficos para determinação da ponderação da área ideal para as temperaturas da pele; a utilização da termografia para obtenção da temperatura média radiante; estudos em manequins aquecidos ou seres ativos para obtenção da resistência da vestimenta em questão; medição de suor secretado; ensaios para se obter o coeficiente convectivo e radiante; e situações variando a temperatura.

8. REFERÊNCIAS

ASTM 1291-90, **Standard Test Method for Measuring the Thermal Insulation of Clothing Using a Heated Manikin**. 1990

WAHRLICH, V. ; ANJOS, L. A. **Aspectos históricos e metodológicos da medição e estimativa da taxa metabólica basal: uma revisão da literatura**. Rio de Janeiro: Cad. saúde pública, 2001.

ASHRAE- Thermal comfort (Ch. 9). Atlanta: ASHRAE HANDBOOK, 2009.

ASHRAE- Measurements and instruments (Ch. 36). Atlanta: ASHRAE HANDBOOK, 2009.

ASHRAE- Mass Transfer (Ch. 6). Atlanta: ASHRAE HANDBOOK, 2009.

BSR/ASHRAE – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (Standard 55P). Atlanta, 2003

Fanger, P.O.. **Thermal Comfort - Analysis and Applications in Environmental Engineering**, Danish Technical Press, Copenhagen, 1970.

ISO 8996. **Ergonomics of the thermal environment – Determination of metabolic heat production**. Bruxelas, 2001.

McCutchan, J. W. e Taylor, C. L.; **Respiratory heat exchange with varying temperature and humidity of inspired air**. Journal of Applied Physiology 4, p.121-135, 1951

ISO 7933. **Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain**, Suíça, 2004.

ISO 8996. **Ergonomics of the thermal environment – Determination of metabolic heat production** , Bélgica, 2001.

SCHUMACHER, Marcelo. **Uma nova Metodologia para Avaliar e Especificar o Comportamento Térmico das Vestimentas**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

FONSECA, P. H. S. **Validação de equações de predição da taxa metabólica em repouso em adolescentes**, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

9. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

Pagnossin, E. M.;Buriol, G. A.; Graciolli, M. A.. **Influência dos elementos meteorológicos no conforto térmico humano: bases biofísicas**. Santa Maria: *Disciplinarum Scientia*. Série: Ciên. Biol. e da Saúde v.2, n.1, p.149-161, 2001

Marchini, J.S.;Fett, C.A.; Fett, W.C.; Suen, V.M.M. **Calorimetria: aplicações práticas e considerações críticas**. Fitness & Performance Journal, v.4, p. 90-96, Ribeirão Preto, 2005.

Silva, N. R.. **Avaliação do conforto térmico**. Universidade Santa Cecília, Santos, 2007

Epstein, Y.; Moran, D. S.. **Thermal Comfort and the Heat Stress Indices**. Industrial Health 2006, 44, p. 388-398, Israel, 2006

APENDICE A

Tabela 1. Equações para coeficientes de transferência de calor convectivos (ASHRAE, 2009)

Equação	Limites	Condição	Fonte
$h_c = 8,3V^{0,6}$	$0,2 < V < 4,0$	Sentado com ar em movimento	Mitchell (1974)
$h_c = 3,1$	$0 < V < 0,2$		
$h_c = 2,7 + 8,7V^{0,67}$	$0,15 < V < 1,5$	Deitado com ar em movimento	Colin e Houdas (1967)
$h_c = 5,1$	$0 < V < 0,2$		
$h_c = 8,6V^{0,53}$	$0,5 < V < 2,0$	Caminhando sem movimento do ar	V é a velocidade do caminhar, Nishi e Gagge (1970)
$h_c = 5,7(M - 0,8)^{0,39}$	$1,1 < M < 3,0$	Ativo sem movimento do ar	Gagge et al. (1976)
$h_c = 6,5V^{0,39}$	$0,5 < V < 2,0$	Caminhando na esteira sem movimento de ar	V é a velocidade da esteira, Nishi e Gagge (1970)
$h_c = 14,8V^{0,69}$	$0,15 < V < 1,5$	Parado com ar em movimento	Seppänen et al. (1972)
$h_c = 4,0$	$0 < V < 0,15$		

,onde h_c é dado em $W/(m^2.K)$, V em m/s, e M em mets (1 met = 58,1 W/m^2).

Tabela 2. Isolamento típico e valores de permeabilidade para combinações de vestimentas (Fonte: ASHRAE, 2009)

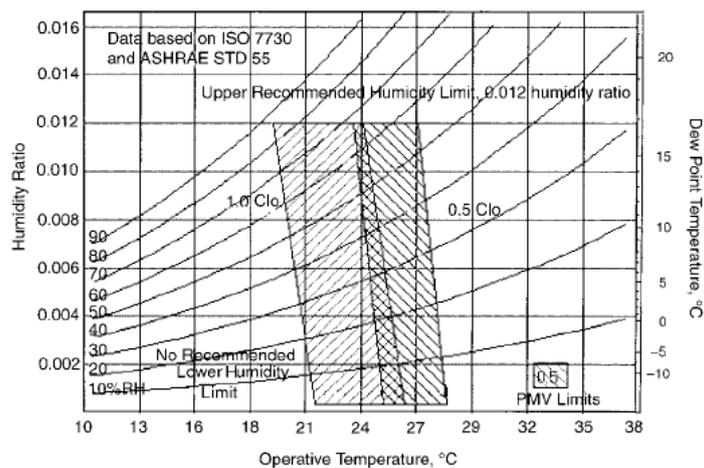


Figura 1. Faixa de conforto térmico pelo PMV. (Fonte: ASHRAE 2003)

Tabela 2. Isolamento das vestimentas (Fonte: ASHRAE 2009)

Ensemble Description ^a	I_{cl} , clo	I_{t} , ^b clo	f_{cl}	i_{cl}	i_m ^b
Walking shorts, short-sleeved shirt	0.36	1.02	1.10	0.34	0.42
Trousers, short-sleeved shirt	0.57	1.20	1.15	0.36	0.43
Trousers, long-sleeved shirt	0.61	1.21	1.20	0.41	0.45
Same as above, plus suit jacket	0.96	1.54	1.23		
Same as above, plus vest and T-shirt	1.14	1.69	1.32	0.32	0.37
Trousers, long-sleeved shirt, long-sleeved sweater, T-shirt	1.01	1.56	1.28		
Same as above, plus suit jacket and long underwear bottoms	1.30	1.83	1.33		
Sweat pants, sweat shirt	0.74	1.35	1.19	0.41	0.45
Long-sleeved pajama top, long pajama trousers, short 3/4 sleeved robe, slippers (no socks)	0.96	1.50	1.32	0.37	0.41
Knee-length skirt, short-sleeved shirt, panty hose, sandals	0.54	1.10	1.26		
Knee-length skirt, long-sleeved shirt, full slip, panty hose	0.67	1.22	1.29		
Knee-length skirt, long-sleeved shirt, half slip, panty hose, long-sleeved sweater	1.10	1.59	1.46		
Same as above, replace sweater with suit jacket	1.04	1.60	1.30	0.35	0.40
Ankle-length skirt, long-sleeved shirt, suit jacket, panty hose	1.10	1.59	1.46		
Long-sleeved coveralls, T-shirt	0.72	1.30	1.23		
Overalls, long-sleeved shirt, T-shirt	0.89	1.46	1.27	0.35	0.40
Insulated coveralls, long-sleeved thermal underwear, long underwear bottoms	1.37	1.94	1.26	0.35	0.39

Source: From McCullough and Jones (1984) and McCullough et al. (1989).

^aAll ensembles include shoes and briefs or panties. All ensembles except those with panty hose include socks unless otherwise noted.

^bFor $t_a = t_m$ and air velocity less than 0.2 m/s ($I_{cl} = 0.72$ clo and $i_m = 0.48$ when nude).
1 clo = 0.155 (m²·K)/W.

Tabela 3. Valores típicos para taxa metabólica para diversas atividades (Fonte: ASHRAE,2009)

	W/m ²	met*
Resting		
Sleeping	40	0.7
Reclining	45	0.8
Seated, quiet	60	1.0
Standing, relaxed	70	1.2
Walking (on level surface)		
3.2 km/h (0.9 m/s)	115	2.0
4.3 km/h (1.2 m/s)	150	2.6
6.4 km/h (1.8 m/s)	220	3.8
Office Activities		
Reading, seated	55	1.0
Writing	60	1.0
Typing	65	1.1
Filing, seated	70	1.2
Filing, standing	80	1.4
Walking about	100	1.7
Lifting/packing	120	2.1
Driving/Flying		
Car	60 to 115	1.0 to 2.0
Aircraft, routine	70	1.2
Aircraft, instrument landing	105	1.8
Aircraft, combat	140	2.4
Heavy vehicle	185	3.2
Miscellaneous Occupational Activities		
Cooking	95 to 115	1.6 to 2.0
Housecleaning	115 to 200	2.0 to 3.4
Seated, heavy limb movement	130	2.2
Machine work		
sawing (table saw)	105	1.8
light (electrical industry)	115 to 140	2.0 to 2.4
heavy	235	4.0
Handling 50 kg bags	235	4.0
Pick and shovel work	235 to 280	4.0 to 4.8
Miscellaneous Leisure Activities		
Dancing, social	140 to 255	2.4 to 4.4
Calisthenics/exercise	175 to 235	3.0 to 4.0
Tennis, singles	210 to 270	3.6 to 4.0
Basketball	290 to 440	5.0 to 7.6
Wrestling, competitive	410 to 505	7.0 to 8.7

Sources: Compiled from various sources. For additional information, see Buskirk (1960), Passmore and Dumin (1967), and Webb (1964).
*1 met = 58.1 W/m²

APÊNDICE B

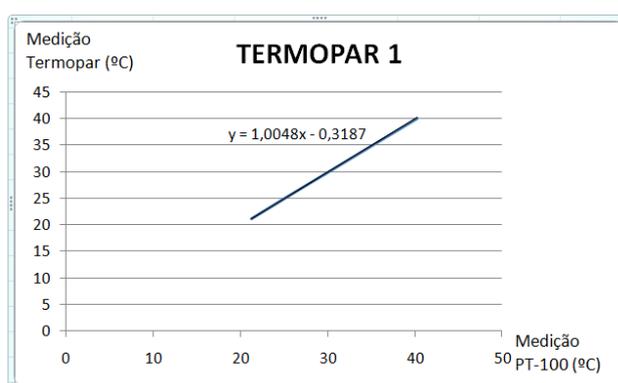


Figura 1. Curva de calibração do termopar 1

Tabela 1. Equações de calibração dos termopares

		T(°C) = a.t + b			
Termopar	a	b	Termopar	a	b
1	1,0048	-0,3187	10	1,0009	-0,4153
2	1,0041	-0,3512	11	1,0026	0,467
3	1,0033	-0,3397	12	1,0026	0,4858
4	1,0023	-0,3642	13	1,0031	0,4941
5	1,0002	-0,3433	14	1,0042	0,487

6	0,9982	-0,3244	15	1,001	0,3856
7	0,9974	-0,3053	16	1,0018	0,3492
8	0,997	-0,2854	17	1,0022	0,3311
9	0,9983	-0,3374			

T é a temperatura real e calibrada e t é a temperatura medida pelo termopar, dados em °C.

Tabela 2. Disposição detalhada dos pontos de medição da temperatura da pele

Termopar	Posição
1	Ao lado da boca, 3 cm abaixo do zigomático
2	1/3 superior da parte superior da flange proximal do 2º dedo do pé esquerdo
3	1/3 superior da parte superior da flange proximal do 2º dedo do pé direito
4	Articulação do pulso
5	1/3 superior do comprimento da coxa
6	Metade da distância do osso do dedo médio
7	Maior circunferência no centro da posterior da coxa
8	Maior circunferência da panturrilha
9	Proeminência calcânea
10	Borda inferior da escápula
11	Crista ilíaca póstero-superior
12	Borda da 12ª costela
13	Parte interna do peito, 7 cm a 45° para cima e para o centro
14	Na maior circunferência do tríceps
15	Medição da temperatura do ar
16	3 cm para a esquerda do umbigo
17	Na 3ª vértebra cervical (Nuca)

Tabela 3. Temperaturas médias dos pontos da pele para os três casos

Referência	Ponto	Tpele Caso 1 (°C)	Tpele Caso 2 (°C)	Tpele Caso 3 (°C)
Boca	1	34,9	34,3	34,9
Pé esquerdo	2	28,9	30,7	34,8
Pé direito	3	29,0	30,9	34,9
Pulso	4	26,1	25,0	24,5
Coxa frente	5	32,6	31,5	34,5
Mão	6	25,8	24,9	24,1
Coxa posterior	7	31,9	31,2	33,4
Panturrilha	8	28,7	29,0	32,3
Calcanhar	9	23,2	25,0	29,9
Alto das costas	10	33,1	32,9	33,5
Nádega	11	33,1	33,1	34,8
Meio das costas	12	32,6	32,5	32,7
Peito	13	33,6	33,4	35,5
Tríceps	14	31,1	30,9	34,3
Umbigo	16	32,7	33,3	34,4
Nuca	17	32,9	32,9	34,6

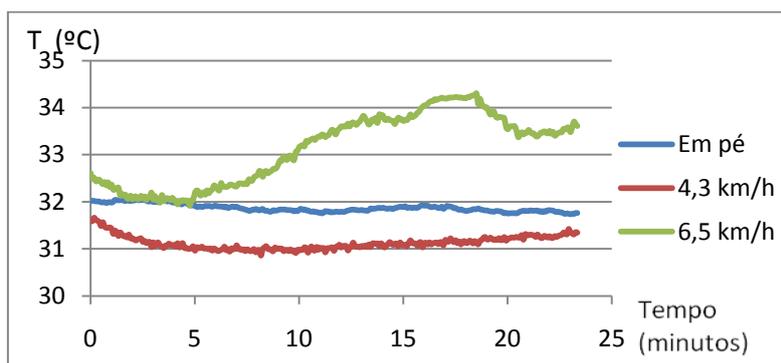


Figura 2. Temperatura da coxa em função do tempo.