

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

EVANDRO EDUARDO BRODAY

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE
DETERMINAÇÃO DA TAXA METABÓLICA VISANDO O EQUILÍBRIO
ENTRE O HOMEM E O AMBIENTE**

DISSERTAÇÃO

PONTA GROSSA

2013

EVANDRO EDUARDO BRODAY

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE
DETERMINAÇÃO DA TAXA METABÓLICA VISANDO O EQUILÍBRIO
ENTRE O HOMEM E O AMBIENTE**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção: Gestão Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Augusto de Paula Xavier

Co-orientador: Prof. Dr. Reginaldo de Oliveira

PONTA GROSSA

2013

Ficha catalográfica elaborada pelo Departamento de Biblioteca
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa
n.11/13

B864 Broday, Evandro Eduardo

Análise comparativa entre os métodos de determinação da taxa metabólica
visando o equilíbrio entre o homem e o ambiente / Evandro Eduardo Broday. --
Ponta Grossa: 2013.

93 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Augusto de Paula Xavier

Co-orientador: Prof. Dr. Reginaldo de Oliveira

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Tecnológica Federal do
Paraná. Ponta Grossa, 2013.

1. Ambiente de trabalho. 2. Conforto humano. 3. Temperatura - Efeito fisiológico. 4.
Ergonomia. I. Xavier, Antonio Augusto de Paula. II. Oliveira, Reginaldo de. III.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná. IV. Título.

CDD 670.42



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



FOLHA DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação Nº **225/2013**

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA TAXA
METABÓLICA VISANDO O EQUILÍBRIO ENTRE O HOMEM E O AMBIENTE**

por

Evandro Eduardo Broday

Esta dissertação foi apresentada às **14 horas** de **06 de março de 2013** como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, com área de concentração em Gestão Industrial, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. O candidato foi argüido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo citados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Fernando Simon Westphal (UFSC)

Prof. Dr. Reginaldo de Oliveira (UTFPR)

Prof. Dr. Luiz Alberto Pilatti (UTFPR)

**Prof. Dr. Antonio Augusto de Paula
Xavier (UTFPR) - Orientador**

Visto do Coordenador:

Prof. Dr. João Luiz Kovaleski

Coordenador do PPGEP

**A FOLHA DE APROVAÇÃO ASSINADA ENCONTRA-SE NO DEPARTAMENTO DE
REGISTROS ACADÊMICOS DA UTFPR – CÂMPUS PONTA GROSSA**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus Pai Todo-Poderoso e a Nossa Senhora do PÉrpetuo Socorro por tornarem tudo isso possível.

Aos meus pais Sérgio e Rosângela, por nunca deixarem me faltar nada e estarem sempre presentes em minha vida, inclusive nos momentos de maiores dificuldades me dando suporte emocional e financeiro e também por terem me formado um cidadão de bem, incentivando sempre a busca de crescimento com o trabalho honesto.

A minha avó Maria Joana, que mesmo não estando mais entre nós, sempre acreditou em mim.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Antonio Augusto de Paula Xavier, por mais esta orientação concluída, o qual é minha inspiração para um dia se tornar um grande professor.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Reginaldo de Oliveira, que de forma brilhante e dedicada ajudou-me a construir parte desta pesquisa.

A todos os meus colegas da C-106, em especial a Siumara, por sempre ter estado disponível quando eu precisei, pelas conversas e ensinamentos da vida de professor e também a Dra. "Kátea".

Aos meus colegas de Mestrado André Soares, Giselle Cogo e Silvia Grudzinski, pela amizade e auxílios durante a pesquisa. Agradeço também a Vivian Machado pela ajuda com as medições.

A secretária da Pós-Graduação Simone Freire, por sempre estar disponível para ajudar com o que for preciso.

A empresa que cedeu espaço para a realização da pesquisa, bem como a todos os funcionários que se dispuseram a ajudar neste trabalho.

A UTFPR, por disponibilizar ensino público e de qualidade para a minha formação.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

"Se cheguei até aqui foi porque me
apoei no ombro dos gigantes".
(Isaac Newton)

RESUMO

BRODAY, Evandro Eduardo. **Análise comparativa entre os métodos de determinação da taxa metabólica visando o equilíbrio entre o homem e o ambiente**. 2013. 93 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2013.

A taxa metabólica é a produção de calor pelo organismo e a sua incorreta determinação pode estar ligada a discrepâncias entre o modelo do PMV e a sensação térmica real coletada em estudos de campo. O PMV (Voto Médio Estimado) é um índice que prediz o valor médio dos votos de um grande grupo de pessoas. Visando melhorar a aderência do modelo do PMV e da sensação térmica real, este trabalho determinou novos valores para a taxa metabólica de duas formas: uma forma denominada “calculada” utilizando-se o Método de Newton e de forma “real” utilizando-se de um analisador metabólico. Foram avaliadas as atividades do soldador, através das medições das variáveis ambientais e pessoais, durante o pleno desenvolvimento das atividades. Determinaram-se, para esta atividade, novos valores de taxa metabólica. Os valores encontrados para a forma calculada e real foram, respectivamente, 178,63 e 145,46 W/m², diferentes do intervalo fornecido pelo ISO 8996 (2004) para esta atividade (75 a 125 W/m²). Verificou-se qual dos valores de taxa metabólica mais aproximou a sensação térmica real do PMV. Para isto, executou-se a regressão linear entre o PMV e a sensação térmica real de três formas: $S \times PMV_{\text{tabelado}}$ ($R^2 = 0,1749$), $S \times PMV_{\text{calculado}}$ ($R^2 = 0,7481$) e $S \times PMV_{\text{real}}$ ($R^2 = 0,7854$). Observou-se que os valores obtidos de forma “real” proporcionaram o maior coeficiente de determinação, sendo então este o escolhido para a correção da tabela. A correção da tabela fornece um M_{predito} e para as atividades do soldador, em uma indústria metal-mecânica, os valores tabelados podem ser multiplicados pelo coeficiente de correção de 1,4648 a fim de minimizar imprecisões. O PMV_{predito} , obtido através do M_{predito} , quando relacionado com a sensação térmica real, fornece um coeficiente de determinação de 0,7511, melhorando assim o modelo do PMV.

Palavras-chave: Taxa Metabólica. PMV. Método de Newton. Discrepâncias. Sensação Térmica Real.

ABSTRACT

BRODAY, Evandro Eduardo. **Comparative analysis of methods for determining the metabolic rate in order to provide a balance between man and the environment.** 2013. 93 p. Dissertation (Master in Production Engineering) - Federal Technological University of Paraná. Ponta Grossa, 2013.

Metabolic rate consists of the production of heat by the body and its incorrect determination can be linked to discrepancies between the model of the PMV and real thermal sensation collected in field studies. PMV (Predicted Mean Vote) is an index that predicts the mean value of the votes of a large group of people. Aiming at improve adherence to the PMV model and the real thermal sensation, this work established new values for the metabolic rate in two ways: one way being called "calculated" using the Newton's Method and the other called "real" using a metabolic analyzer. Welder's activities were evaluated, through the measurements of environmental and personal variables, during the full development of the activities determining new values of metabolic rate for this activity. It was determined, for this activity, new values of metabolic rate. The values found for calculated and real were, respectively, 178.63 and 145.46 W/m², different from the range provided by ISO 8996 (2004) for this activity (75 to 125 W/m²). It was verified which of the metabolic rate's values was closer to the real thermal sensation of PMV. For this, it was made a linear regression between the PMV and the real thermal sensation in three ways: $S \times PMV_{\text{tabulated}}$ ($R^2 = 0.1749$), $S \times PMV_{\text{calculated}}$ ($R^2 = 0.7481$) and $S \times PMV_{\text{real}}$ ($R^2 = 0,7854$). It was found that the values obtained in "real" gave a higher coefficient of determination, and then being this the choice for the correction of the table. The table provides a $M_{\text{predicted}}$ and for the activities of the welder in a metal-mechanics industry, tabulated values can be multiplied by the correction coefficient 1.4648 in order to minimize inaccuracies. The $PMV_{\text{predicted}}$, obtained through the $M_{\text{predicted}}$, when related to the actual thermal sensation, provides a coefficient of determination of 0.7511, thereby improving the model of the PMV.

Keywords: Metabolic Rate. PMV. Newton's Method. Discrepancies. Real Thermal Sensation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Controle fisiológico do equilíbrio térmico corporal.....	17
Figura 2 - Mecanismos de perda de calor para o ambiente	18
Figura 3 – Condição de Conforto Térmico.....	22
Figura 4 – Balanço térmico entre o homem e o ambiente	26
Figura 5 - Variáveis do Conforto Térmico.....	27
Figura 6 – Relação entre PMV e PPD	34
Figura 7 – Metabolismo no corpo humano	36
Figura 8 - Método de Newton: Convergência.....	48
Figura 9 – Postos de trabalho da fábrica.....	50
Figura 10 – Confortímetro Sensu®.....	51
Figura 11 – Analisador Metabólico VO2000®.....	52
Figura 12 - Método para a determinação da equação de regressão entre t_{cl} e M.....	55
Figura 13 – Determinação de M.....	56
Figura 14 – Passos realizados para encontrar a função de correção para a tabela da norma ISO 8996 (2004).....	58
Figura 15 – Passos realizados para verificar se ocorrem melhorias no modelo do PMV.....	59
Figura 16 – Cálculo do t_{cl} pelo Método de Newton	62
Figura 17 – Entrada de dados para o cálculo da taxa metabólica da medição 11	63
Figura 18 – Cálculo de M para a medição 11.....	64
Figura 19 – Analisador Metabólico em situação de trabalho	66
Figura 20 – Formato de apresentação dos dados.....	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Percentagem de pessoas insatisfeitas com o ambiente segundo algum tipo de desconforto térmico	22
Quadro 2 – Escala de sensações térmicas	32
Quadro 3 – Valores aceitáveis para o uso do PMV	33
Quadro 4 – Categorias do ambiente térmico.....	34
Quadro 5 – Níveis de determinação da taxa metabólica	38
Quadro 6 – Valores da taxa metabólica conforme classificação 1.A.....	39
Quadro 7 – Valores da taxa metabólica conforme classificação 1.B.....	40
Quadro 8 – Valores da taxa metabólica conforme segmento corporal e carga de trabalho, classificação 2.A.....	41
Quadro 9 – Valores da taxa metabólica conforme postura corporal, classificação 2.A	41
Quadro 10 – Valores da taxa metabólica conforme atividades específicas, classificação 2.B.....	43
Quadro 11 – Relação entre a frequência cardíaca e taxa metabólica.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores das médias das variáveis ambientais	60
Tabela 2 – Cálculo do tamanho da amostra	60
Tabela 3 – Isolamento da Vestimenta e Sensação Térmica	61
Tabela 4 – Relação entre M e tcl.....	62
Tabela 5 – Valores da Taxa Metabólica Calculada com respectivo PMV	64
Tabela 6 – Valores da Taxa Metabólica Real com respectivo PMV	67
Tabela 7 – Valores da Taxa Metabólica Calculada corrigidos pela Taxa Metabólica Real.....	71
Tabela 8 – Valores da Taxa Metabólica Preditada para a atividade do soldador.....	72
Tabela 9 – Valores do $PMV_{\text{preditado}}$ para a atividade do soldador	73

LISTA DE SIGLAS

ASHRAE	American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
PMV	Predicted Mean Vote – Voto Médio Estimado
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied – Percentagem de pessoas insatisfeitas
ISO	International Organization for Standardization
ATP	Trifosfato de Adenosina

LISTA DE SÍMBOLOS

M	taxa metabólica (W/m^2)
W	energia mecânica eficaz sedentárias (W/m^2)
Q_{sk}	perda de calor através da pele (W/m^2)
Q_{res}	perda de calor através da respiração (W/m^2)
C	perda de calor sensível por convecção pela pele (W/m^2)
R	perda de calor sensível por radiação pela pele (W/m^2)
E_{dsk}	perda de calor latente por difusão do suor pela pele (W/m^2)
E_{esk}	perda de calor latente por evaporação do suor pela pele (W/m^2)
C_{res}	perda de calor sensível por convecção pela respiração (W/m^2)
E_{res}	perda de calor latente por evaporação pela respiração (W/m^2)
ASP	área de superfície corporal (m^2)
m	massa do corpo (kg)
l	estatura do corpo (m)
t_a	temperatura do ar ($^{\circ}C$)
t_{rm}	temperatura radiante média ($^{\circ}C$)
t_{skm}	temperatura média da pele ($^{\circ}C$)
t_{cl}	temperatura da superfície externa da roupa ($^{\circ}C$)
$t_{cr,t}$	temperatura interna timpânica ($^{\circ}C$)
$t_{cr,r}$	temperatura interna retal ($^{\circ}C$)
p_a	pressão parcial de vapor de água (Pa)
I_{cl}	isolamento térmico da vestimenta (clo)

f_{cl}	razão entre a área da superfície corporal do vestido e do corpo nu
h_c	coeficiente de troca de calor por convecção (W/m^2K)
V_a	velocidade do ar ao nível do globo (m/s)
t_g	temperatura de globo ($^{\circ}C$)
H	taxa de produção de calor pelo organismo - metabolismo (W/m^2)
L	carga térmica (W/m^2)
M_0	Taxa metabólica em repouso (W/m^2)
RM	aumento da frequência cardíaca por unidade de taxa metabólica.
EE	energia equivalente, em Watt horas por litro de oxigênio ($W.H/l O_2$)
RQ	quociente respiratório, adimensional.
VCO_2	taxa de produção de dióxido de carbono, em litros de dióxido de carbono por hora
VO_2	taxa de consumo de oxigênio, em litros de oxigênio por hora

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 PROBLEMA	15
1.2 OBJETIVO GERAL	15
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.4 JUSTIFICATIVA	15
1.5 DELIMITAÇÃO DO TEMA	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 O SER HUMANO E O MECANISMO DE TERMOREGULAÇÃO.....	17
2.2 CONFORTO TÉRMICO	20
2.2.1 Conceitos Básicos	20
2.2.2 O modelo do Balanço Térmico.....	22
2.2.3 Variáveis do Conforto Térmico.....	27
2.2.4 <i>Predicted Mean Vote</i> – Voto Médio Estimado (PMV)	31
2.2.5 Normalização em Conforto Térmico	34
2.3 TAXA METABÓLICA.....	36
2.4 O MÉTODO DE NEWTON.....	47
3 METODOLOGIA	50
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	50
3.2 DESCRIÇÃO DA EMPRESA E DELIMITAÇÃO DO LOCAL DE TRABALHO .	50
3.3 PROCEDIMENTOS DE COLETA DE DADOS	51
3.4 DETERMINAÇÃO DA TAXA METABÓLICA CALCULADA ($M_{\text{CALCULADO}}$)	53
3.4.1 O Método de Newton para obtenção da taxa metabólica calculada	53
3.4.2 O Método de Newton para Determinação da Regressão Não-Linear Cúbica entre a taxa metabólica e a temperatura de superfície da vestimenta	54
3.5 ANÁLISE DOS VALORES DE TAXA METABÓLICA OBTIDOS.....	55
3.6 PASSOS PARA A CORREÇÃO DA TABELA ISO 8996 (2004)	57
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS	60
4.1 OBTENÇÃO DO $M_{\text{CALCULADO}}$	60
4.1.1 Coleta de dados.....	60
4.1.2 Determinação da equação não-linear cúbica entre a taxa metabólica e temperatura de superfície da vestimenta	61
4.1.3 Determinação do $M_{\text{calculado}}$ utilizando-se o método de Newton.....	63
4.2 OBTENÇÃO DO M_{REAL}	65
4.2.1 Coleta de dados.....	65
4.2.2 Determinação do M_{real}	67
4.3 REGRESSÃO LINEAR ENTRE A SENSAÇÃO TÉRMICA REAL E O PMV	68
4.4 OBTENÇÃO DA FUNÇÃO DE CORREÇÃO (M_{PREDITO})	70
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	77
REFERÊNCIAS.....	79
ANEXO A – QUESTIONÁRIO DE PESQUISA	86
APÊNDICE A – DADOS AMBIENTAIS PARA OBTENÇÃO DA TAXA METABÓLICA CALCULADA ($M_{\text{CALCULADO}}$).....	88
APÊNDICE B – DADOS PESSOAIS PARA OBTENÇÃO DA TAXA METABÓLICA CALCULADA ($M_{\text{CALCULADO}}$)	90
APÊNDICE C – DADOS AMBIENTAIS PARA OBTENÇÃO DO PMV.....	92

1 INTRODUÇÃO

O ser humano preocupa-se com seu conforto desde a antiguidade. Em toda sua existência, o homem sempre buscou adaptar-se às condições impostas pelo ambiente. No princípio procurou proteger-se em cavernas das condições climáticas adversas e depois, após desenvolver suas habilidades manuais, passou a se abrigar em casas e cabanas adaptadas ao seu meio (DIAS, 2009; FELIX et al., 2010).

Tendo em vista a importância do bem-estar das pessoas nos ambientes, situa-se a ergonomia, que segundo Parsons (2000), “pode ser definida como a aplicação de conhecimentos para desenvolver sistemas, que garantam a utilização pelo maior número de pessoas possível, com o máximo de conforto para os usuários”.

O conceito de conforto ambiental admite outros tipos de conforto: térmico, visual, acústico e qualidade do ar (XAVIER, 2000). Este estudo enfatizará o conforto térmico que, segundo Frontczak e Wargocki (2011), apresenta seis variáveis distintas: temperatura do ar, velocidade do ar, temperatura radiante média, umidade relativa, isolamento da vestimenta e a taxa metabólica, objeto de estudo desta pesquisa.

A taxa metabólica é produzida pelo organismo, por meio da transformação de energia química em energia mecânica e térmica. Este trabalho irá encontrar um valor calculado para a taxa metabólica utilizando-se do Método de Newton, através da sensação térmica real dos trabalhadores em uma indústria metal-mecânica, sendo que os trabalhadores estudados nesta pesquisa são soldadores. A taxa metabólica também será determinada utilizando-se de um analisador metabólico.

Os valores calculados e reais obtidos serão utilizados para determinar um novo valor de PMV. Após a determinação do PMV será realizada sua regressão linear com a sensação térmica real. O modo de determinação da taxa metabólica (calculado ou real) que apresentar o coeficiente de determinação mais alto será escolhido para corrigir a tabelada ISO 8996 (2004).

Dessa forma os valores reais e calculados serão comparados, sendo que o resultado da comparação fornece um $M_{\text{corrigido}}$. Este valor será utilizado para fazer uma comparação com os valores tabelados da norma, obtendo dessa forma o M_{predito} , com a equação de correção para os valores tabelados.

Através do M_{predito} determina-se um PMV_{predito} . Após esta determinação será realizada a regressão linear entre a Sensação Térmica Real e o PMV_{predito} para, por fim, poder verificar se ocorre melhoria do modelo do PMV através da minimização das imprecisões dos valores da taxa metabólica tabelada.

1.1 PROBLEMA

Qual seria a melhoria no modelo do PMV minimizando-se as imprecisões da taxa metabólica?

1.2 OBJETIVO GERAL

Verificar a melhoria do modelo do PMV através da minimização das imprecisões dos valores da taxa metabólica tabelada.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Propor equações de correção para os valores tabelados da ISO 8996 (2004) da atividade de soldador;
- Determinar um método para encontrar um valor calculado para a taxa metabólica ($M_{\text{calculado}}$);
- Determinar o valor real da taxa metabólica (M_{real});
- Verificar o ajuste do PMV e sensação térmica real utilizando a taxa metabólica;

1.4 JUSTIFICATIVA

Araújo (1996), Humphreys (1996), De Dear et. al (1998), Xavier (2000), Vergara (2001), Havenith et. al (2002), Pinto (2011) e Antonelli (2012) afirmam que os resultados do modelo do PMV quando é utilizada a sensação térmica real das pessoas coletadas em pesquisas de campo apresentam discrepâncias significativas.

Um dos possíveis fatores para esta disparidade é a determinação da taxa metabólica. De acordo com Havenith et al. (2002) e Katavoutas et al. (2009), a taxa metabólica estimada para pessoas, desempenhando uma mesma atividade, não

deve ser utilizada de forma generalizada, devido às diferenças individuais e às possíveis influências psicológicas ou sociológicas no ambiente de trabalho. Os valores tabelados apresentados na ISO 8996 (2004) são generalizados, pois nas tabelas não se considera o modo pela qual a atividade é desempenhada, o tempo de exposição ao ambiente de trabalho, a forma de execução da tarefa e tão pouco a adaptação da pessoa à atividade, o que pode levar a distorções (ANTONELLI, 2012).

1.5 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Algumas limitações encontradas nesta pesquisa:

- A pesquisa ocorre em uma indústria metal-mecânica, sendo que os resultados encontrados podem ser aplicados para indústrias do mesmo segmento;
- Como esta pesquisa trata especificamente da variável taxa metabólica, as outras variáveis são assumidas como não tendo uma imprecisão tão impactante, muito embora é sabido que existe a probabilidade significativa de imprecisões em outras variáveis com caráter subjetivo. Na verdade, o isolamento térmico da vestimenta só é conhecido devido às tabelas da ISO 9920 (2007), sendo da mesma forma da taxa metabólica, uma possível fonte de discrepâncias entre a sensação térmica real e o PMV;
- Considera-se, também, que o analisador metabólico, pelo fato de estar calibrado, fornece valores corretos e precisos da taxa metabólica, não sendo este uma fonte de erro, muito embora seja sabido que o operador fazendo uso do analisado metabólico está sujeito a variações em seu ritmo psicofisiológico que pode alterar sua taxa metabólica;
- Esta pesquisa utiliza o número mínimo de amostra recomendado pela literatura para que os dados possam ser considerados distribuídos conforme a curva da Distribuição Normal. Se a amostra for significativamente maior, pode ser que os resultados venham apresentar variabilidade.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O SER HUMANO E O MECANISMO DE TERMOREGULAÇÃO

O ser humano é homeotérmico, ou seja, mantém sua temperatura interna constante seja qual for a mudança ambiental (IVANOV, 2006). O corpo humano mantém uma temperatura constante de aproximadamente 37°C. Esta temperatura é adquirida pelo mecanismo de termorregulação, que é a habilidade do corpo humano em balancear a produção de calor pelo organismo e as perdas de calor para o meio externo (MALCHAIRE, 2004).

No hipotálamo há um grande número de neurônios, com duas características distintas: alguns são sensíveis ao calor e outros são sensíveis ao frio. O equilíbrio entre todos esses neurônios funciona como sensores térmicos do equilíbrio corporal (GUYTON, 1992).

De acordo com Andreasi (2009), sempre que os centros térmicos localizados no hipotálamo verificam que a temperatura corporal está alta ou baixa, são acionados os mecanismos de controle, estes responsáveis para que a temperatura permaneça constante.

Para Kroemer e Grandjean (2005) há um centro de controle de calor, responsável por regular o fluxo sanguíneo e a produção de suor. O sangue é capaz de absorver calor dos capilares e dissipar para os tecidos, sendo fundamental para controle da temperatura.

Assim, o equilíbrio térmico do corpo humano é ajustado de três maneiras: transporte de calor por circulação sanguínea, secreção do suor e produção de calor por tremores musculares (KROEMER e GRANDJEAN, 2005). A figura 1 representa o controle fisiológico:

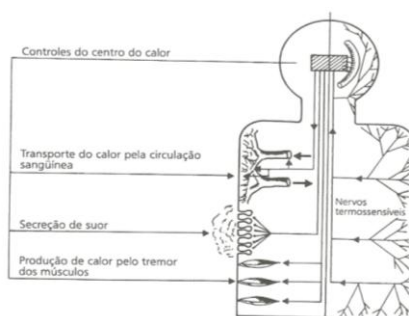


Figura 1 - Controle fisiológico do equilíbrio térmico corporal
Fonte: Kroemer e Grandjean (2005)

De acordo com Prek (2005), o equilíbrio corporal é obtido por meio do balanceamento entre a produção de calor, fenômeno esse chamado de termogênese, e a taxa de calor dissipado para o ambiente, fenômeno este conhecido como termólise.

Segundo Monteiro (2008), em situações de frio, ocorre um aumento da termogênese, devido ao aumento da taxa metabólica. Ocorrem tremores musculares, devido ao resfriamento excessivo. A termólise, por sua vez, é diminuída por meio da piloereção, vasoconstricção, hipovolemia e inibição da sudorese. Por outro lado, quando se trata de situações de calor, a termogênese diminui, devido a diminuição da taxa metabólica. A termólise aumenta, devido a vasodilatação, ausência de piloereção e hipervolemia (MONTEIRO, 2008; ANDREASI, 2009).

A termorregulação humana é observada em todas as fases da vida, desde o nascimento. De acordo com Çinar e Filiz (2006), em recém-nascidos a perda de calor é maior devido à evaporação do líquido amniótico da pele, pois o bebê deixa o ambiente úmido e quente do útero. Desde bebês até adultos, os mecanismos de perda de calor para o ambiente ocorrem, e se dão por quatro formas: condução, convecção, radiação e evaporação, como ilustrado na figura 2:

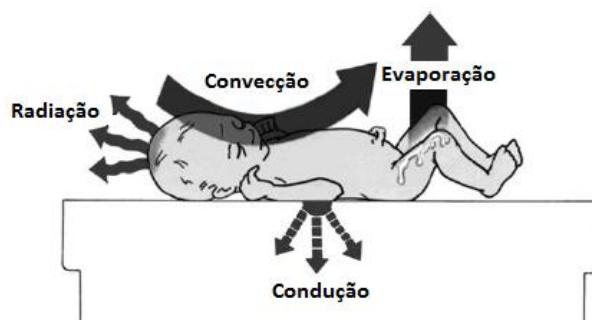


Figura 2 - Mecanismos de perda de calor para o ambiente

Fonte: Çinar e Filiz (2006)

O mecanismo de condução se dá quando ocorre transferência de energia das partículas mais energéticas de uma substância para partículas vizinhas menos energéticas, devido a interação existente entre elas (ÇENGEL, 2009). Goldstein et al. (2010) afirmam que o processo de condução pode ocorrer em sólidos, líquidos ou gases, onde o calor se propaga em todas as direções e o processo de transferência de calor ocorre entre dois corpos de temperaturas diferentes.

Segundo Incropera e de Witt (2011), o processo de convecção ocorre quando há transferência de energia entre uma superfície sólida e uma líquida, que está em movimento e que envolve efeitos combinados de condução e movimentação do fluido. Çengel (2009) afirma que quanto mais rápido for o movimento do fluido, maior será a taxa de transferência de calor por convecção.

Para Goldstein et al. (2010), a convecção pode ser classificada de acordo a natureza do escoamento. Pode-se, assim, ter uma convecção natural ou uma convecção forçada. A convecção é dita natural quando o escoamento do fluido é induzido por forças de empuxo, originadas devido a diferentes densidades causadas por variações na temperatura do fluido (INCROPERA e DE WITT, 2011). A convecção é dita forçada quando o fluido é “forçado” a escoar pela superfície por meios externos, tais como ações de ventiladores, bombas ou ventos atmosféricos (ÇENGEL, 2009).

O fenômeno da radiação ocorre através da emissão de energia sob a forma de ondas eletromagnéticas (GOLDSTEIN et al., 2005). Incropera e de Witt (2011) afirmam que essa emissão ocorre devido às mudanças ocorridas nas configurações eletrônicas dos átomos e moléculas que constituem a matéria. A transferência por radiação não necessita, necessariamente, de um meio material para ocorrer, acontecendo mais eficientemente no vácuo.

A evaporação é a mudança do estado líquido para o estado gasoso, sendo que, segundo Michaloski (2002), pode ocorrer de três maneiras: transpiração, perspiração (transpiração não-perceptível) e pelo processo de respiração, através da expiração de ar pelos pulmões. De acordo com Kroemer e Grandjean (2005), a grandiosidade da perda de calor pelo processo de evaporação depende da área da pele e da diferença de pressão de vapor da água entre o ar que está próximo da pele e o restante do ar ambiente.

Andreasi (2009) afirma que quando a temperatura da pele é maior que a temperatura do ambiente, ocorre perda de calor por radiação e condução. Se a temperatura ambiente é maior que a temperatura da pele, o corpo ganhará calor por convecção. Assim, o único modo que o corpo perde calor é por evaporação, devido as glândulas sudoríparas.

2.2 CONFORTO TÉRMICO

2.2.1 Conceitos Básicos

A definição clássica de conforto térmico, de acordo com a ASHRAE 55 (2004), é: “uma condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico”. Esta definição aplica o conforto térmico para um indivíduo (FRONTCZAK e WARGOCKI, 2011).

Fanger, pioneiro nos estudos de conforto térmico, começou seus estudos em câmaras climatizadas na Dinamarca na década de 70. Estes estudos serviram como base para a elaboração de normas referentes ao conforto térmico, como a ISO 7730 (2005).

Segundo Felix et al. (2010), quando um ambiente não possui características adequadas ao uso, ocorrem condições adversas, como má qualidade do ar, desconforto térmico localizado, problemas de saúde e queda de produtividade.

Nesse sentido, para estar em conforto térmico, é necessário que a pessoa esteja confortável no ambiente em questão e mantenha constante a sua temperatura corporal, sem que haja a necessidade de acionar mecanismos de defesa contra o frio ou contra o calor (MICHALOSKI, 2002).

Assim, chega-se a definição de neutralidade térmica, que de acordo com Djongyang, Tchinda e Njomo (2010), ocorre neutralidade térmica quando o indivíduo não prefere sentir nem mais calor e nem mais frio no ambiente em que se encontra.

De acordo com Jang, Koh e Moon (2007), existem seis variáveis importantes no conforto térmico, sendo duas variáveis pessoais (taxa metabólica e isolamento da vestimenta) e quatro ambientais (temperatura do ar, velocidade do ar, temperatura radiante média e umidade relativa). Em intensidade menor, outras variáveis também influenciam no conforto térmico, tais como: idade, sexo e poder aquisitivo (INDAGRANTI e RAO, 2010).

Conforme Fanger (1970), três são as condições para que ocorra conforto térmico: neutralidade térmica, a temperatura da pele e a secreção do suor devem ser compatíveis com a atividade desenvolvida, e a pessoa não pode sentir nenhum tipo de desconforto térmico localizado.

Estar em neutralidade térmica é condição necessária para se encontrar em conforto térmico, no entanto, não é condição suficiente. A pessoa pode estar em neutralidade térmica, porém pode também estar sujeita a algum tipo de desconforto térmico localizado (CÂNDIDO, 2010).

Segundo Xavier (2000), a temperatura da pele e a taxa de secreção de suor dependem da atividade desenvolvida pela pessoa, demonstrando assim que mesmo se estando em neutralidade térmica pode-se estar sujeito a algum tipo de desconforto.

Conforme Leite (2003) foi determinado por Rohles e Nevins expressões para a temperatura média da pele e a taxa de evaporação de suor, conforme equações (1) e (2). As equações abaixo fornecem os requisitos para se encontrar em conforto térmico em função da atividade desempenhada:

$$t_{skm} = 35,7 - 0,0275.M \quad (1)$$

$$E_{sw} = 0,42.(M - 58,15) \quad (2)$$

Com relação ao desconforto térmico localizado, são através de quatro formas distintas que alguém pode se encontrar em desconforto (ISO 7730 [2005]):

- Correntes de ar: desconforto causado por um resfriamento localizado em alguma parte do corpo (GRIEFAHN et al., 2001). De acordo com Leite (2003), verifica-se que em partes descobertas do corpo, como a cabeça, pescoço e pernas, a sensibilidade as correntes de ar é maior. Conforme Cândido et al. (2010), a intensidade do fenômeno está associada a intensidade da turbulência e a área do corpo exposta;
- Assimetria de radiação térmica: é quando a pessoa tem uma parte do seu corpo atingida por radiação e outras não (LOVE e TIAN, 2008). Conforme consta na ASHRAE 55 (2004), as pessoas são mais sensíveis à radiação assimétrica causada por um teto quente do que a causada por superfícies verticais quentes e frias;
- Diferença de temperatura do ar (sentido vertical): a temperatura do ar tende a aumentar quando mais distante fica do piso e mais próximo fica do teto. Sendo a diferença de temperatura entre o nível da cabeça e a temperatura do tornozelo, ocorre desconforto por calor na cabeça e frio nos pés, mesmo que o corpo esteja em neutralidade térmica (LEITE, 2003);
- Temperatura do piso: pode haver desconforto nos pés, devido ao piso estar quente ou frio, mesmo as pessoas estando calçadas (ASHRAE 55, 2004).

O quadro 1 abaixo, fornece, de acordo com a ASHRAE 55 (2004), a percentagem de pessoas insatisfeitas em um dado ambiente, relacionado a cada tipo de desconforto térmico:

Classe	% de insatisfeitos pelas correntes de ar	% de insatisfeitos pela diferença de temperatura vertical	% de insatisfeitos pela assimetria de radiação	% de insatisfeitos pela temperatura de piso
A	<10	<3	<5	<10
B	<20	<5	<5	<10
C	<20	<10	<10	<15

Quadro 1 – Percentagem de pessoas insatisfeitas com o ambiente segundo algum tipo de desconforto térmico

Fonte: ASHRAE 55 (2004)

Assim, se a pessoa se encontra em neutralidade térmica, a temperatura da pele e a taxa de secreção de suor estão compatíveis com a atividade desenvolvida e não exposto a nenhum tipo de desconforto térmico, então, encontra-se a situação de conforto térmico, conforme figura 3:



Figura 3 – Condição de Conforto Térmico

Fonte: Autoria própria

2.2.2 O modelo do Balanço Térmico

O conforto térmico está fortemente ligado ao modelo do balanço térmico. Para que ocorra balanço térmico, a produção de calor por processos metabólicos do

corpo humano deve ser igual à perda de calor para o ambiente externo (DJONGYANG, TCHINDA e NJOMO, 2010).

A produção de calor se dá por meio do metabolismo e as perdas de calor se dão por meio da respiração e da pele (XAVIER, 2000; AMPOFO et al., 2004). As perdas de calor ocorrem nas modalidades sensível e latente, em termos de fatores ambientais. O balanço térmico inclui tanto as variáveis ambientais (temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar e umidade do ar) e as variáveis pessoais (taxa metabólica e isolamento da vestimenta) (PARSONS, 2000).

Considerando o modelo do balanço térmico em estado estacionário, assume-se que o corpo está em equilíbrio, não acumulando calor em seu anterior, estando assim próximo à condição de neutralidade térmica (CHEN e NG, 2012).

De acordo com Kilic et al. (2006), o balanço de energia térmica do corpo é dado pela equação (3):

$$M - W = Q_{sk} + Q_{res} \quad (3)$$

Como as perdas de calor pela pele (Q_{sk}) e pela respiração são expressas em forma de modos de dissipação de calor (convecção, radiação e evaporação), atinge-se a equação do balanço de energia (4) (KILIC et al., 2006):

$$M - W = Q_{sk} + Q_{res} = (C + R + E_{dsk} + E_{esk}) + (C_{res} + E_{res}) \quad (4)$$

onde:

M = taxa metabólica (W/m^2);

W = energia mecânica eficaz, nula para a maioria das atividades sedentárias (W/m^2);

Q_{sk} = perda de calor através da pele (W/m^2);

Q_{res} = perda de calor através da respiração (W/m^2);

C = perda de calor sensível por convecção pela pele (W/m^2);

R = perda de calor sensível por radiação pela pele (W/m^2);

E_{dsk} = perda de calor latente por difusão do suor pela pele (W/m^2);

E_{esk} = perda de calor latente por evaporação do suor pela pele (W/m^2);

C_{res} = perda de calor sensível por convecção pela respiração (W/m^2);

E_{res} = perda de calor latente por evaporação pela respiração (W/m^2);

Como pode ser observado, todos as unidades de medida dos termos da equação (4) são dados em energia por unidade de área. Conforme Zolfaghari e Maerefat (2010), os termos se referem à área corporal nu ou área de superfície corporal. Assim, a equação (5) fornece a expressão de DuBois:

$$ASP = 0,202 \cdot m^{0,425} \cdot l^{0,725} \quad (5)$$

onde:

ASP = área de superfície corporal (m²);

m = massa do corpo (kg);

l = estatura do corpo (m).

Conforme Xavier (2000), o calor produzido pelo corpo menos a dissipação de calor por respiração e evaporação de calor pelo suor, deve ser igual ao calor sensível perdido por convecção pela pele e ao calor sensível dissipado pela radiação através da pele. Ainda segundo Xavier (2000), essa dissipação pode ser considerada como uma taxa de calor transferida por condução, conforme equação (6) abaixo:

$$(M - W) - C_{res} - E_{res} - E_{dsk} - E_{esk} = Q_{s,sk} = (C + R) \quad (6)$$

onde:

$Q_{s,sk}$ = taxa de dissipação de calor para o meio por condução, da superfície da pele para a superfície externa da roupa (W/m²).

Todos os termos da equação (6) podem ser representados em função de variáveis ambientais e pessoais, sendo a equação (7) a perda de calor sensível por convecção pela respiração, a equação (8) a perda de calor latente por evaporação pela respiração, a equação (9) a perda de calor latente por difusão do suor pela pele, a equação (10) perda de calor latente por evaporação do suor pela pele, a equação (11) a taxa de dissipação de calor para o meio por condução, a equação (12) a perda de calor sensível por convecção pela pele e a equação (13) a perda de calor sensível por radiação pela pele, como segue:

$$C_{res} = 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \quad (7)$$

$$E_{res} = 0,0173 \cdot M \cdot (5,87 - p_a) \quad (8)$$

$$E_{dsk} = 3,05 \cdot [5,73 - 0,007 \cdot (M - W) - p_a] \quad (9)$$

$$E_{esk} = 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] \quad (10)$$

$$Q_{s,sk} = \frac{t_{skm} - t_{cl}}{0,155 \cdot I_{cl}} \quad (11)$$

$$C = f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \quad (12)$$

$$R = 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{rm} + 273)^4] \quad (13)$$

onde:

t_a = temperatura do ar (°C);

t_{rm} = temperatura radiante média (°C);

t_{skm} = temperatura média da pele (°C);

t_{cl} = temperatura da superfície externa da roupa (°C);

p_a = pressão parcial de vapor de água (Pa);

I_{cl} = isolamento térmico da vestimenta (clo);

f_{cl} = razão entre a área da superfície corporal do vestido e do corpo nu, adimensional;

h_c = coeficiente de troca de calor por convecção (W/m²K);

De acordo com Kilic et al. (2006), substituindo-se as equações de (7) a (13) na equação (5), obtém-se uma dupla equação (14), sendo esta conhecida como equação do balanço térmico:

$$M - W - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - 0,0173 \cdot M \cdot (5,87 - p_a) - 3,05 \cdot [5,73 - 0,007 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot (M - W) - 58,15 = 35,7 - 0,028 \cdot M - W - t_{cl} / 0,155 \cdot I_{cl} = f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) + 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{rm} + 273)^4] \quad (14)$$

A figura 4 mostra como o corpo gera calor e troca com o ambiente. Todo calor gerado pelo metabolismo, é perdido pelos processos de condução, convecção, radiação e evaporação (LEITE, 2003):

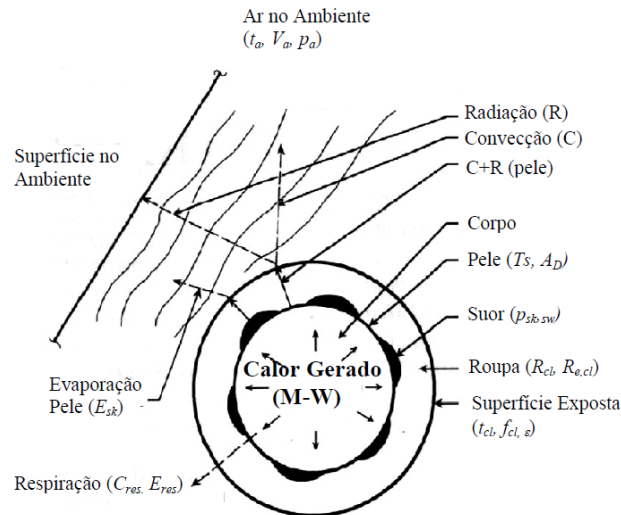


Figura 4 – Balanço térmico entre o homem e o ambiente

Fonte: Leite (2003)

Todas as variáveis ambientais são obtidas através de medições e as variáveis pessoais através de tabelas e dados presentes nas normas, exceto a temperatura superficial externa da vestimenta (FANGER, 1970), dada pela equação (15):

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028M - 0,155 \cdot I_{cl} \cdot \{ 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{rm} + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \} \quad (15)$$

Para o coeficiente de troca de calor por convecção utilizam-se as equações (16.1) e (16.2), devendo ser levado em consideração o maior resultado apresentado. Para a razão entre a área da superfície corporal do vestido e do corpo nu as equações utilizadas são (17.1) e (17.2):

$$h_c = 2,38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0,25} \quad (16.1)$$

$$h_c = 12,1 \cdot \sqrt{V_{ar}} \quad (16.2)$$

$$f_{cl} = 1 + 0,2 \cdot I_{cl}, \text{ para } I_{cl} \leq 0,5 \text{ clo} \quad (17.1)$$

$$f_{cl} = 1,05 + 0,1 \cdot I_{cl}, \text{ para } I_{cl} > 0,5 \text{ clo} \quad (17.2)$$

Seguindo a dupla equação do balanço térmico (14), Fanger determinou a carga térmica (L) que atua sobre o corpo (ANDREASI, 2009). De acordo com Castilla et al. (2011), a carga térmica é a diferença entre o calor produzido pelo corpo e o calor perdido para o ambiente, quando uma pessoa encontra-se em situação de conforto. A equação (18) fornece a carga térmica:

$$L = M - 3,05 \cdot (5,73 - 0,007 \cdot M - p_a) - 0,42 \cdot (M - 58,15) - 0,0173 \cdot M \cdot (5,87 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{rm} + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \quad (18)$$

Como visto até agora, todas as equações apresentam variáveis, sejam ambientais ou pessoais. Estas variáveis serão descritas no próximo item.

2.2.3 Variáveis do Conforto Térmico

De acordo com Alahmer et al. (2011), o conforto térmico possui seis variáveis: temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar, umidade relativa do ar, taxa metabólica e isolamento térmico da vestimenta.

As variáveis do conforto térmico podem ser divididas em: ambientais e pessoais (CHOI et al., 2012). A figura 5 ilustra a classificação das variáveis do conforto térmico:

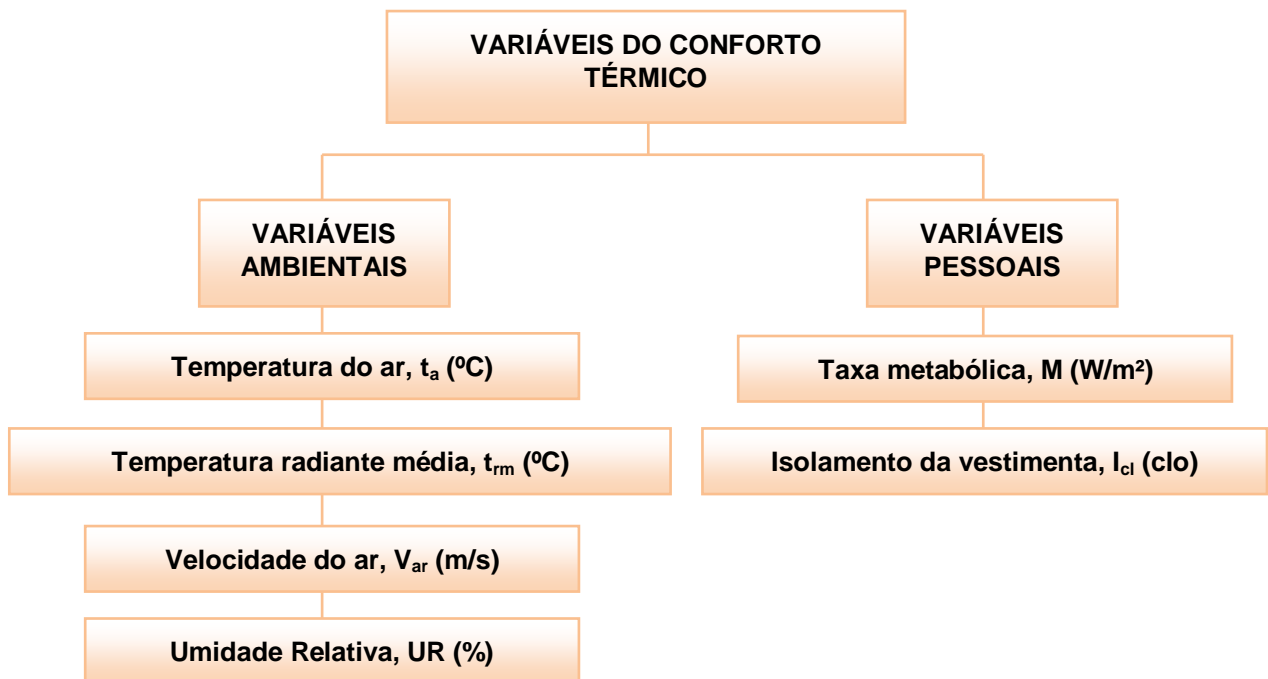


Figura 5 - Variáveis do Conforto Térmico

Fonte: Autoria própria

As variáveis ambientais são aquelas que se referem às condições climáticas do ambiente em questão, enquanto que as variáveis pessoais são aquelas que dizem respeito aos indivíduos no momento da avaliação do ambiente (XAVIER, 2000).

A temperatura do ar (t_a) deve ser levada em consideração quando se está analisando as trocas de calor por convecção ao redor da pessoa (ISO 7726 [1998]). Segundo Andreasi (2009), ao realizar as medições de temperatura do ar, pode-se não encontrar o valor verdadeiro desta variável. Se a medição for realizada de muito longe o valor pode não ser o correto, e se for realizada de muito perto, o corpo vestido pode alterar o resultado.

Malchaire (2004) aponta dois erros comuns na medição da velocidade do ar:

- Inércia do sensor: as respostas à mudança de temperatura não são instantâneas;
- Troca de calor por radiação com o ambiente: o sensor deve ser protegido contra a radiação.

A ISO 7726 (1998) recomenda três medidas para se evitar os problemas com a radiação: reduzir o fator de emissão do sensor, reduzir a temperatura entre o sensor e o meio e aumentar o coeficiente de troca de calor pelo processo de convecção.

A temperatura radiante média (t_{rm}) é “a temperatura uniforme de um ambiente imaginário no qual a transferência de calor por radiação do corpo humano é igual à transferência de calor por radiação em um ambiente real não uniforme” (ISO 7726 [1998]). De acordo com Xavier (2000), a temperatura radiante média pode ser medida utilizando-se de um termômetro de globo negro, sendo este o método mais utilizado. Seu valor depende da velocidade do ar, temperatura do ar e temperatura de globo (SUZUKI, 2010).

Conforme a ISO 7726 (1998), existem duas maneiras de se calcular a temperatura radiante média, dependendo se a convecção for natural ou forçada. Considerando um globo negro de 0,15m de diâmetro, a convecção é dada pelas equações (19) e (20):

- Para a convecção natural:

$$t_{rm} = [(t_g + 273)^4 + 0,4 \cdot 10^8 |t_g - t_a|^{\frac{1}{4}} \cdot (t_g - t_a)]^{\frac{1}{4}} - 273 \quad (19)$$

- Para a convecção forçada:

$$t_{rm} = [(t_g + 273)^4 + 2,5 \cdot 10^8 \cdot Va^{0,6} \cdot (t_g - t_a)]^{\frac{1}{4}} - 273 \quad (20)$$

onde:

| | = módulo;

V_a = velocidade do ar ao nível do globo (m/s);

t_a = temperatura do ar (°C);

t_g = temperatura de globo (°C).

A velocidade do ar (V_{ar}), segundo Monteiro (2008), é descrita pela sua intensidade, direção e sentido. Xavier (2000) afirma que os equipamentos mais comuns para a medição desta variável são os anemômetros de fio quente e os anemômetros de esfera aquecida. Malchaire (2004) salienta que a medição da velocidade do ar deve ser omnidirecional, ou seja, independente da direção da corrente de ar. A velocidade relativa do ar (m/s) é dada pela equação (21):

$$V_{ar} = V_a + 0,0052(M - 58) \quad (21)$$

onde:

V_a = velocidade absoluta do ar, em relação a uma pessoa estática (m/s);

M = taxa metabólica (W/m²).

A Umidade Relativa (UR) é definida como sendo a quantidade de vapor de água contida dentro de um volume de ar úmido, em relação ao total de vapor de água contido dentro deste volume de ar (XAVIER, 2000). É calculado pela razão entre a pressão parcial de vapor no ar úmido e a pressão de saturação de vapor d'água.

A taxa metabólica (M) é a produção de energia pelo corpo. O metabolismo é o custo energético de carga muscular, associado à conversão de açúcares e gorduras em energias térmica e mecânica (MALCHAIRE, 2004).

Segundo Green (2011), a produção de taxa metabólica pelo organismo é um reflexo das atividades celulares, que trabalham no corpo consumindo oxigênio (O₂) e rejeitando dióxido de carbono (CO₂). Segundo Havenith et al. (2002), quanto mais intensa for a atividade realizada, maior será a taxa de calor produzida. Para Malchaire (2004), o metabolismo influencia diretamente no conforto ou desconforto que uma pessoa está sentindo. Em ambientes quentes, um metabolismo muito elevado acelera o desconforto devido ao calor, já que a energia corresponde deve ser perdida para o meio externo.

Conforme disposto na ISO 8996 (2004) a taxa metabólica não possui o mesmo valor para todas as atividades. Sua unidade de medida é o “met”, sendo que 1 met equivale a 58,2 W/m². Um met é utilizado para mensurar a produção de calor de uma pessoa que esteja descansando e sentada, em condições de conforto térmico (HUANG e XU, 2006).

Xavier (2000) ressalta a importância de dois estudos realizados para a determinação da taxa metabólica. O primeiro estudo, de Hayward et al. (1977) apud Xavier (2000), colocou oito pessoas em um tanque contendo água fria, com o objetivo de causar um decréscimo das temperaturas do corpo e da pele. Após o mergulho na água fria, as pessoas tomaram um banho quente. Durante todo o procedimento foram coletadas as médias de temperatura da pele e temperatura interna do corpo (temperaturas timpânica e retal). A taxa metabólica destas pessoas também foi determinada, pelo método do consumo de oxigênio. Os autores correlacionaram a taxa metabólica com as temperaturas interna do corpo e da pele, obtendo as equações (22) e (23) abaixo:

$$M = 0,0356 \cdot (t_{skm} - 41,8) \cdot (t_{cr,t} - 41,03) \quad (22)$$

$$M = 0,0314 \cdot (t_{skm} - 42,23) \cdot (t_{cr,r} - 41,38) \quad (23)$$

onde:

t_{skm} = temperatura média da pele (°C);

$t_{cr,t}$ = temperatura interna timpânica (°C);

$t_{cr,r}$ = temperatura interna retal (°C);

Outro estudo foi realizado por Frank et al. (1999) apud Xavier (2000), mostrou que a temperatura corporal interna é três vezes maior do que a contribuição da temperatura média da pele, para a determinação da taxa metabólica. A correlação dos dados gerou a equação (24):

$$M = 5849 - 112,3 \cdot t_{cr} - 41 \cdot t_{skm} \quad (24)$$

O item 2.3 abordará de forma mais específica e abrangente a taxa metabólica, visto que esta variável exerce papel fundamental nesta pesquisa.

O isolamento térmico da vestimenta (I_{cl}) é uma propriedade das roupas, que representa a resistência que a vestimenta impõe as trocas de calores entre o homem e o ambiente (XAVIER, 2000). De acordo com Havenith et al. (2002), o isolamento térmico das vestimentas foram conseguidos através de experimentos em manequins, sendo que os valores estão relacionados aos movimentos do corpo e ar no ambiente.

A unidade do isolamento térmico da vestimenta é dada por “clo”, sendo que $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ W/m}^2$ (ISO 9920 [2007]). Uma grandeza que também está relacionada ao isolamento térmico da vestimenta é o fator de roupa (f_{cl}), sendo este a razão entre a área do corpo vestido sobre a área do corpo nu (MONTEIRO, 2008).

2.2.4 Predicted Mean Vote – Voto Médio Estimado (PMV)

Como já citado, estar em neutralidade térmica é uma das condições para se estar em conforto térmico. Quando, na equação de balanço de energia, verifica-se um balanço diferente de zero, ou seja, há mais produção de calor do que perdas, ou vice-versa, verifica-se então uma sensação de desconforto térmico (BECKER et al., 2003).

Conforme Xavier (2000), considerando-se um estado permanente de troca de calor a carga térmica é nula. No entanto, ao se considerar a equação do balanço de energia no estado estacionário, faz-se então a classificação dos ambientes que não são termicamente neutros, em uma abordagem subjetiva.

De acordo com Yao, Li e Liu (2009), com base no equilíbrio de calor entre o corpo e o ambiente, no estado estacionário e considerando também a carga térmica, Fanger encontrou a equação do PMV, conforme mostra a equação 25:

$$PMV = [0,303 \cdot \exp. (-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot L \quad (25)$$

onde:

PMV = *Predicted Mean Vote* – Voto Médio Estimado;

M = taxa metabólica (W/m^2);

L = carga térmica (W/m^2).

O *Predicted Mean Vote* – Voto Médio Estimado (PMV) é um índice que mostra a média de sensação térmica de um grande grupo de pessoas expostas a um mesmo ambiente (ALAHMER et al., 2011; WEI, LIN, SUN, LI, 2010). De acordo com Humphreys e Nicol (2002), o PMV é o índice de conforto térmico mais utilizado para avaliar a sensação térmica em um ambiente moderado.

Segundo Coutinho (2005), um ambiente moderado é aquele que não proporciona sensação extrema de calor ou de frio. Portanto, um ambiente moderado engloba as situações onde há conforto térmico e também onde existem condições ligeiramente desconfortáveis.

Este índice varia de -3 a +3, em uma escala de sete pontos, onde cada resposta representa como a pessoa se sente em relação ao ambiente em que se encontra. A escala pode ser vista no Quadro 2 (ISO 7730 [2005]):

+3	Quente
+2	Aquecido
+1	Levemente aquecido
0	Neutro
-1	Levemente refrescado
-2	Refrescado
-3	Frio

Quadro 2 – Escala de sensações térmicas
Fonte: ISO 7730 (2005)

A equação (25), usada para a resposta média da predição de votos da sensação térmica, pode ser estendida, adicionando-se à carga térmica, da equação (18), resultando então a equação (26):

$$\begin{aligned}
 \text{PMV} &= [0,303 \cdot \exp. (-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot \\
 &\left\{ \begin{aligned}
 &((M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [(5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a)] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] \\
 &- 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \\
 &- 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{rm} + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)
 \end{aligned} \right. \quad (26)
 \end{aligned}$$

A norma ISO 7730 (2005) recomenda o uso do cálculo do PMV em situações onde os valores do voto médio estimado pertencem à faixa da escala de sensações entre -2 e +2, levando-se em consideração outros parâmetros como apresentado no Quadro 3:

Variável	Faixa de Valores aceitáveis das variáveis para uso do PMV
Taxa metabólica	46 a 232 W/m ²
Isolamento da vestimenta	0 a 0,310 m ² .K/W
Temperatura radiante média	10 a 40 °C
Velocidade relativa do ar	0 a 1 m/s
Pressão parcial de vapor de água	0 a 2700 Pa
Temperatura do ar	10 a 30 °C

Quadro 3 – Valores aceitáveis para o uso do PMV

Fonte: ISO 7730 (2005)

Segundo Tian et al. (2011), através do PMV é possível obter a percentagem de pessoas insatisfeitas - *predicted percentage of dissatisfied* (PPD). De acordo com a ISO 7730 (2005), são considerados insatisfeitos com o ambiente todos aqueles que votam na escala de sensação térmica em +3 (quente), +2 (aquecido), -2 (resfriado) e -3 (frio). A equação que determina o PPD segundo a Norma ISO 7730 (2005) é dada pela equação (27):

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2) \quad (27)$$

A equação (24) mostra uma relação com o aspecto de neutralidade térmica (PMV=0). A curva que representa a relação entre PPD e PMV tem um valor mínimo de PPD correspondente à zero em PMV. Assim, quando se substitui o valor zero na equação (24), significa a condição de conforto ótima, onde 5% são insatisfeitos perante 95% de satisfeitos (DJONGYANG, TCHINDA e NJOMO, 2010; HENS, 2009). A relação gráfica entre PMV e PPD pode ser visualizada na figura 6:

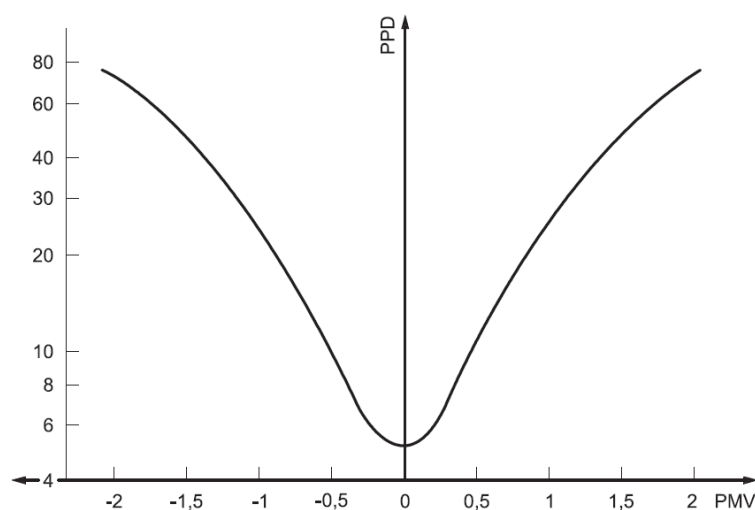


Figura 6 – Relação entre PMV e PPD

Fonte: ISO 7730 (2005)

Conforme salientam Djongyang, Tchinda e Njomo (2010) é comum que sejam estabelecidas zonas de conforto. Estas zonas de conforto são definidas em três categorias, de acordo com a ISO 7730 (2005), sendo especificada em cada categoria a zona de aceitabilidade térmica em função de um número máximo de insatisfeitos e valores mínimos e máximos para o PMV.

Assim, segundo o anexo A da ISO 7730 (2005), existem três categorias (A, B, C) para avaliar a percentagem de insatisfeitos com o ambiente, sendo que a categoria considera um ambiente confortável termicamente com no máximo 6% de insatisfeitos, a categoria B com no máximo 10 % de insatisfeitos e a categoria C com no máximo 15% de insatisfeitos, conforme mostra o Quadro 4:

Categoria	PPD (%)	PMV
A	<6	-0,2 < PMV < +0,2
B	<10	-0,5 < PMV < +0,5
C	<15	-0,7 < PMV < +0,7

Quadro 4 – Categorias do ambiente térmico

Fonte: ISO 7730 (2005)

2.2.5 Normalização em Conforto Térmico

As normas referentes ao conforto térmico são embasadas nos estudos realizados por Fanger em 1970 em câmaras climatizadas. As normas não só

padronizam considerações teóricas relacionadas ao conforto térmico, como também algumas considerações práticas, tais como a maneira correta de se realizar as medições das variáveis, tanto ambientais como pessoais (XAVIER, 2000). Serão descritos neste item apenas as normas referentes ao conforto térmico que serão, efetivamente, utilizadas nesta dissertação.

A Norma ISO 7730 (2005), intitulada como “Ergonomia de Ambientes Térmicos – Determinação analítica e interpretação do conforto térmico pelo cálculo dos índices PMV e PPD e pelos critérios de conforto térmico local”, apresenta métodos de predição da sensação térmica e do grau de insatisfeitos em ambientes moderado.

Os votos preditos de sensação térmica e a percentagem de pessoas insatisfeitas calculados são úteis para determinar as condições ideais de um ambiente, assim como para afirmar quando um local é desconfortável termicamente. Essas formas de predição são aplicáveis em locais onde há tanto homens como mulheres saudáveis que estão expostos a variações térmicas moderadas. Conforme cita Malchaire (2004), o objetivo é constatar um ambiente que contente o máximo de pessoas e seja desconfortável para um número mínimo.

A Norma ISO 7726 (1996), intitulada como “Ergonomia de Ambientes Térmicos – Aparelhos para Medição das grandezas físicas”, tem por objetivo demonstrar de que forma deve-se proceder para a obtenção dos valores das variáveis ambientais necessárias para calcular o PMV e PPD (MALCHAIRE, 2004). Esta norma especifica as características mínimas que devem possuir os instrumentos de medição das grandezas físicas de um ambiente, bem como os métodos de medição dessas variáveis (ALFANO et al.,2011). Pode ser utilizada para ambientes moderados ou sujeitos a estresse térmico.

A Norma ISO 8996 (2004), intitulada como “Ergonomia – Determinação da produção de calor metabólico”, refere-se à determinação da produção do calor metabólico, ou como tratado neste trabalho, a taxa metabólica (M). Basicamente, essa norma fornece níveis distintos para determinar a taxa metabólica, sendo realizadas das seguintes maneiras: conforme o tipo de atividade de ocupação; utilizando tabelas que estimam a taxa metabólica por atividade específica de acordo com a taxa cardíaca e através de medições diretas do consumo de oxigênio.

Pelo fato desta dissertação trabalhar especificamente com a taxa metabólica, seus meios de obtenção e características serão descritos minuciosamente no item 2.3.

A Norma ISO 9920 (1995), intitulada como “Ergonomia de Ambientes Térmicos – Estimativa do Isolamento térmico e resistência à água de vapor em um conjunto de vestuário”, busca a estimativa do isolamento térmico e a resistência evaporativa da vestimenta, considerando a resistência por calor sensível e latente, baseada em valores conhecidos por peças e tecidos.

A ASHRAE 55 (2004) aborda as condições para ocupação humana em ambientes térmicos. As informações contidas nesta norma são referentes à temperatura efetiva que é utilizada para definir limites, retratando zonas de conforto distintas para verão e inverno. Essa norma aborda também isolamento de vestimentas, desconforto térmico e os períodos e locais apropriados para realizar as medições de todas as variáveis ambientais.

2.3 TAXA METABÓLICA

O processo metabólico começa com a alimentação, ocorrendo transformação de energia química em mecânica e térmica (XAVIER, 2000). A figura 7 ilustra como ocorre o processo de metabolismo no corpo humano:

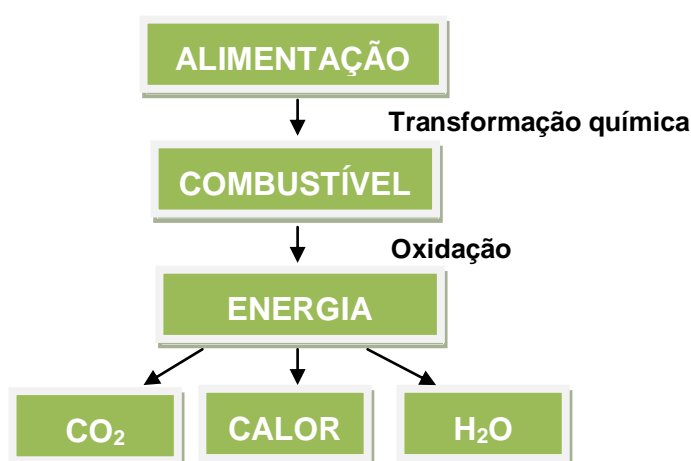


Figura 7 – Metabolismo no corpo humano
Fonte: Adaptado Xavier (2000)

Toda a energia produzida pelo organismo deve deixar a pessoa apta a: manter-se viva (metabolismo basal) e executar atividades (metabolismo adicional)

(XAVIER, 2000). Segundo BRUNETTO et al. (2010), o metabolismo basal é a energia utilizada para a manutenção das funções básicas do organismo, em condições de repouso. O somatório dessas duas porções de metabolismo é a taxa metabólica (XAVIER, 2000).

As moléculas de trifosfato de adenosina (ATP) guardam a energia liberada pelos nutrientes em forma de energia utilizada por todas as células do organismo. O consumo de ATP cresce à medida que se aumenta a magnitude e frequência de contração muscular. Se o consumo de ATP é realizado através de respiração aeróbica, os níveis de oxigênio aumentam (GREEN, 2011).

O corpo utiliza comida e oxigênio para produção de energia. A taxa com a qual isto ocorre é denominada taxa metabólica (HAVENITH et al., 2002). A grande maioria da energia produzida pelo organismo é medida como taxa, mas parte desta energia é utilizada para o desenvolvimento de trabalho. A taxa de produção de calor pelo organismo pode ser observada na equação (28):

$$H = M - W \quad (28)$$

onde:

H = taxa de produção de calor pelo organismo - metabolismo (W/m^2);

M = taxa metabólica (W/m^2);

W = energia mecânica eficaz (W/m^2).

Havenith et al. (2002), afirmam que a energia mecânica varia de 0 a 20% da taxa metabólica e na prática, é muito difícil de ser mensurada. Para a maioria das atividades, a energia mecânica eficaz (W) é nula. No estado permanente de energia, a quantidade de metabolismo produzido é deduzida do consumo de oxigênio, calculada a partir da taxa de ventilação do ar e a diferença de concentração entre o ar inspirado e expirado (DJONGYANG, TCHINDA e NJOMO, 2010).

Todas as estimações para os valores de taxa metabólica são feitas considerado uma média para homens e mulheres (ISO 8996 [2004]):

- homens: 30 anos de idade, 70 kg de massa corporal, 1,75 m de altura e área de superfície corporal de 1,8 m²;

- mulheres: 30 anos de idade, 60 kg de massa corporal, 1,70 m de altura e área de superfície corporal de 1,6 m²;

De acordo com a norma ISO 8996 (2004), existem métodos para se determinar o metabolismo, dividindo-se em quatro níveis distintos, conforme mostra o Quadro 5:

Nível	Método	Acuracidade	Inspeção do Posto de Trabalho
1	1.A: Classificação de acordo com a ocupação	Informações Brutas O risco de erro é muito grande	Não necessário, mas precisa-se de informações dos equipamentos
	1.B: Classificação de acordo com a atividade		
2	2.A: Determinação da taxa metabólica em função da postura corporal	Alto risco de erro Acuracidade: $\pm 20\%$	É necessário tempo para estudo
	2.B: Determinação da taxa metabólica através de tabelas, segundo a atividade desenvolvida		
3	3A: Determinação da taxa metabólica através da taxa cardíaca	Médio risco de erro Acuracidade: $\pm 10\%$	É necessário tempo para estudo
4	4.A: Determinação da taxa metabólica através do consumo de oxigênio	Erros dentro do limite de acuracidade da medição e do tempo de estudo Acuracidade: $\pm 5\%$	É necessário tempo para estudo
	4.B: Método da água duplamente marcada		Inspeção não necessária, mas devem-se avaliar as atividades de lazer
	4.C: Calorimetria Direta		Inspeção no local de trabalho não é necessária

Quadro 5 – Níveis de determinação da taxa metabólica

Fonte: Adaptado e Traduzido ISO 8996 (2004)

O nível 1, *rastreio*, propõe dois métodos simples para caracterizar rapidamente a carga física de trabalho para um profissional ou uma determinada atividade. Esses métodos fornecem uma avaliação pouco precisa (MALCHAIRE, 2004). O anexo A da ISO 8996 (2004) fornece os valores da taxa metabólica para diferentes ocupações. O Quadro 6 mostra algumas taxas metabólicas dependendo da ocupação:

Ocupação	Taxa Metabólica (W/m ²)	
Trabalho de escritório	Trabalho sedentário	55 a 70
	Trabalho administrativo	70 a 100
	Zelador	80 a 115
Artesanato	Pedreiro	110 a 160
	Carpinteiro	110 a 175
	Vidraceiro	90 a 125
	Pintor	100 a 130
	Padeiro	110 a 140
	Açougueiro	105 a 140
	Reparador de Relógio	55 a 70
Indústria da mineração	Transportador	70 a 85
	Carvoeiro	110
	Trabalhador da mineração	115 a 175
Indústria do Aço e Ferro	Trabalhador de alto-forno	170 a 220
	Operador de forno elétrico	125 a 145
	Moldagem Manual	140 a 240
	Moldagem na Máquina	105 a 165
	Fundição	140 a 240
Indústria Metal mecânica	Ferreiro	90 a 200
	Soldador	75 a 125
	Torneiro	75 a 125
	Perfurador	80 a 140
	Precisão Mecânica	70 a 110
Ocupações Gráficas	Desenhista	70 a 95
	Encadernador	75 a 100
Agricultura	Jardineiro	115 a 190
Trânsito	Motorista de Trator	85 a 110
	Motorista de Carro	70 a 100
	Motorista de Ônibus	75 a 125
	Condutor de Trem	80 a 115
	Operador de guindaste	65 a 145
Várias Ocupações	Assistente de Laboratório	85 a 100
	Professor	85 a 100
	Vendedor	100 a 120
	Secretário	70 a 85

Quadro 6 – Valores da taxa metabólica conforme classificação 1.A

Fonte: Adaptado e Traduzido – Anexo A, ISO 8996 (2004)

A ISO 8996 (2004), também em seu anexo A, traz os valores da taxa metabólica de acordo com o tipo de atividade, seguindo a classificação 1.B. Esta classificação considera 5 níveis de taxa metabólica, de acordo com o Quadro 7:

Classe	Taxa metabólica média (com intervalos)		Exemplos
	W/m ²	W	
0 Repouso	65 (55 a 70)	115 (100 a 125)	Descansando, sentado à vontade.
1 Taxa Metabólica Baixa	100 (70 a 130)	180 (125 a 235)	<ul style="list-style-type: none"> - Trabalho manual leve (escrever, digitar, desenhar); - Trabalho utilizando mãos e braços (atividades de inspeção, montagem e separação de materiais leves); - Trabalho utilizando mãos e pernas (dirigir veículos ou controlar algum tipo de pedal); - Trabalho em pé (perfuração, fresamento, enrolamento de bobinas, operação de máquinas com ferramentas de baixa potência, caminhada a uma velocidade de até 2,5 Km/h).
2 Taxa Metabólica Moderada	165 (130 a 200)	295 (235 a 360)	<ul style="list-style-type: none"> - Trabalho utilizando mãos e braços (martelo e enchimento); - Trabalho utilizando braços e pernas (operar caminhões, tratores ou equipamentos de construção); - Trabalho utilizando braços e tronco: trabalho com martelo pneumático, montagem de trator, manipulação de gesso, trabalhos com manipulação intermitente de material moderadamente pesado, colheita de frutas ou legumes, empurrar ou puxar carrinhos de peso ou carrinhos de mão, caminhar a uma velocidade de 2,5 km/h a 5,5 km/h, forjamento.
3 Taxa Metabólica Alta	230 (200 a 260)	415 (400 a 465)	- Trabalho intenso com o braço e o tronco: carregamento de material pesado; serrar; cinzelar madeira; escavação; caminhar a uma velocidade de 5,5 a 7 km/h. Empurrar ou puxar carrinho de mão muito carregado ou carregar bloco de concreto.
4 Taxa Metabólica muito alta	290 (>260)	520 (>465)	- Atividade muito intensa em ritmo elevado; trabalhar com um machado; subir escadas e rampas; caminhar rapidamente em passos pequenos; correr; caminhar a uma velocidade superior a 7 km/h.

Quadro 7 – Valores da taxa metabólica conforme classificação 1.B

Fonte: Adaptado e Traduzido – Anexo A, ISO 8996 (2004)

O nível 2, *observação*, propõe dois métodos de taxa metabólica, propostas para pessoas tendo um conhecimento perfeito das condições de trabalho, mas sem haver necessariamente uma formação em fisiologia do trabalho (MALCHAIRE, 2004). No método A, o metabolismo é determinado em função da postura do corpo e dos segmentos corporais, em função da zona da intensidade do trabalho e dos segmentos corporais aplicados (Quadro 8):

Segmento Corporal		Carga de Trabalho		
		Leve	Média	Pesada
As duas mãos	Média	70	85	95
	Intervalo	<75	75 a 90	>90
Um braço	Média	90	110	130
	Intervalo	<100	100 a 120	>120
Os dois braços	Média	120	140	160
	Intervalo	<130	130 a 150	>150
Corpo	Média	180	245	335
	Intervalo	<210	210 a 285	>285

Quadro 8 – Valores da taxa metabólica conforme segmento corporal e carga de trabalho, classificação 2.A

Fonte: Adaptado e Traduzido – Anexo B, ISO 8996 (2004)

O Quadro 9 abaixo mostra os valores de referência de acordo com a postura corporal:

Postura corporal	Taxa metabólica (W/m ²)
Sentado	0
Ajoelhado	10
Agachado	10
Em pé	15
Em pé parado	20

Quadro 9 – Valores da taxa metabólica conforme postura corporal, classificação 2.A

Fonte: Adaptado e Traduzido – Anexo B, ISO 8996 (2004)

No método B, o metabolismo é determinado em função de um conjunto de atividades específicas. De acordo com Malchaire (2004), em situações de trabalho que implicam um ciclo de diferentes atividades, um estudo de tempos e métodos é necessário para determinar a taxa metabólica. A taxa metabólica, de acordo com as atividades, pode ser visualizada no Quadro 10:

Atividades	Taxa Metabólica (W/m ²)
Dormindo	40
Reclinando-se	45
Descansando, sentado	55
Descansando, em pé	70
Caminhada no mesmo nível, em piso sólido	
1. Sem carga a 2km/h	110
a 3km/h	140
a 4km/h	165
a 5km/h	200
2. Com carga 10 kg, a 4km/h	185
30 kg, a 4km/h	250
Caminhada em nível diferente, em piso sólido	
1. Sem carga 5° de inclinação, a 4km/h	180
15° de inclinação, a 3km/h	210
25° de inclinação, a 3km/h	300
2. Com carga de 20 kg 15° de inclinação, a 4km/h	270
25° de inclinação, a 4km/h	410
Descer uma ladeira a 5 km/h, com carga 5° de inclinação	135
15° de inclinação	140
25° de inclinação	180
Escada a 70°, subir a uma taxa de 11,2 m/min	
Sem carga	290
Com carga de 20 kg	360
Empurrar ou puxar um vagão, a 3,6 km/h	
Empurrar com força de 12kg	290
Puxar com força de 16kg	375
Empurrar um carrinho-de-mão, mesmo nível, a 4,5km/h, pneus de borracha, carga de 100 kg	230
Depósito de ferro 42 movimentos/min	100
60 movimentos/min	190

Trabalhar com um martelo, utilizando as duas mãos, sendo a massa do martelo 4,4 kg, 15 movimentos / min	290	
Trabalho de Carpintaria	Serrar com a mão	220
	Serrar com a serradeira	100
	Plano de serragem com a mão	300
Colocação de tijolos, 5 tijolos/min		170
Parafusar		100
Cavar uma trincheira		290
Atividade sedentária (escritório, casa, escola, laboratório)		70
Em pé, atividades leves (compras, laboratório, indústria leve)		95
Em pé, atividade média (vendedor, doméstica, operador)		115
Operador de máquina		
	Leve (ajuste, montagem)	100
	Médio (carregamento)	140
	Pesado	210
Operador com ferramenta de mão		
	Leve (polimento)	100
	Médio (polimento)	160
	Pesado (perfuração)	230

Quadro 10 – Valores da taxa metabólica conforme atividades específicas, classificação 2.B
Fonte: Adaptado e Traduzido – Anexo B, ISO 8996 (2004)

O nível 3, *análise*, propõe analisar a taxa metabólica através da frequência cardíaca. Segundo Malchaire (2004), a frequência cardíaca aumenta com o nível de atividade metabólica. Esta relação pode ser predita para uma pessoa, relacionando seu peso e sua idade. De acordo com Monteiro (2008), para se conhecer a taxa metabólica pelo método da frequência cardíaca, faz-se necessário que a atividade realizada utilize grande esforço físico dos músculos corporais. Green (2011) salienta que para manter uma completa oxigenação do sangue para os tecidos, ocorre um aumento na taxa de ventilação no coração e pulmão, para que estes aumentem o fluxo sanguíneo para os tecidos. De acordo com a ISO 8996 (2004), a frequência cardíaca (HR) em determinado instante é dada pela equação (29):

$$HR = HR_0 + \Delta HR_M + \Delta HR_S + \Delta HR_T + \Delta HR_N + \Delta HR_E \quad (29)$$

onde:

HR_0 = frequência cardíaca, em batimentos por minuto, em repouso e posição deitada, dentro de condições térmicas neutras;

ΔHR_M = aumento da frequência cardíaca, devido à carga muscular dinâmica, dentro de condições térmicas neutras;

ΔHR_S = aumento da frequência cardíaca, devido ao trabalho muscular estático. Este componente depende da relação entre a força utilizada e a força voluntária máxima do grupo muscular em funcionamento;

ΔHR_T = aumento da frequência cardíaca, devido ao estresse térmico;

ΔHR_N = aumento da frequência cardíaca, devido à carga mental;

ΔHR_E = componente residual da frequência cardíaca, devido aos efeitos respiratórios, ritmo cardíaco e desidratação.

A relação entre a frequência cardíaca e a taxa metabólica pode ser verificada pela medição da frequência cardíaca em diferentes níveis de carga muscular (ISO 8996 [2004]). Conforme Monteiro (2008) deve-se considerar que:

- A frequência cardíaca deve ser superior a 120 bpm (batimentos por minuto);
- Vinte (20) bpm abaixo da taxa cardíaca máxima.

A relação entre a frequência cardíaca e a taxa metabólica é dada pela equação (30):

$$HR = HR_0 + RM \cdot (M - M_0) \quad (30)$$

onde:

M_0 = taxa metabólica em repouso (W/m^2) – valor de $55 W/m^2$;

RM = aumento da frequência cardíaca por unidade de taxa metabólica.

A capacidade máxima de trabalho (MWC) pode ser estimada utilizando-se as equações (31) para homens e (32) para mulheres, em função da idade e peso:

$$MWC = (41,7 - 0,22 \cdot A) \cdot P^{0,666} \quad (31)$$

$$MWC = (35 - 0,22.A). P^{0,666} \quad (32)$$

onde:

A = idade, em anos;

P = peso, em kg.

Em seu anexo C, a ISO 8996 (2004) traz a relação entre a taxa metabólica e a frequência cardíaca, predita em função do peso e da idade, conforme mostra o Quadro 11:

Idade (anos)	Peso (kg)				
	50	60	70	80	90
Mulheres					
20	2,9 x HR - 150	3,4 x HR - 181	3,8 x HR - 210	4,2 x HR - 237	4,0 x HR - 228
30	2,8 x HR - 143	3,3 x HR - 173	3,7 x HR - 201	4,0 x HR - 228	4,0 x HR - 228
40	2,7 x HR - 136	3,1 x HR - 165	3,5 x HR - 192	3,9 x HR - 218	4,0 x HR - 228
50	2,6 x HR - 127	3,0 x HR - 155	3,4 x HR - 182	3,7 x HR - 207	4,0 x HR - 228
60	2,5 x HR - 117	2,9 x HR - 145	3,2 x HR - 170	3,6 x HR - 195	4,0 x HR - 228
Homens					
20	3,7 x HR - 201	4,2 x HR - 238	4,7 x HR - 273	5,2 x HR - 307	5,6 x HR - 339
30	3,6 x HR - 197	4,1 x HR - 233	4,6 x HR - 268	5,1 x HR - 301	5,5 x HR - 333
40	3,5 x HR - 192	4,0 x HR - 228	4,5 x HR - 262	5,0 x HR - 295	5,4 x HR - 326
50	3,4 x HR - 186	4,0 x HR - 222	4,4 x HR - 256	4,9 x HR - 288	5,3 x HR - 319
60	3,4 x HR - 180	3,9 x HR - 115	4,5 x HR - 249	4,8 x HR - 280	5,2 x HR - 311

Quadro 11 – Relação entre a frequência cardíaca e taxa metabólica

Fonte: Adaptado e Traduzido – Anexo C, ISO 8996 (2004)

No nível 4, *especialização*, três métodos são apresentados para determinação da taxa metabólica. No método 4.A, a taxa metabólica é determinada através do consumo de oxigênio.

De acordo com Monteiro (2008), o corpo humano é capaz de guardar pequenas quantidades de oxigênio, sendo que este oxigênio é absorvido da atmosfera por meio da respiração. Assim, considerando o ser humano em estado permanente, pode-se afirmar que a taxa metabólica é igual a taxa de consumo de oxigênio (GREEN, 2011).

Segundo a ISO 8996 (2004), a determinação da taxa metabólica pela taxa de consumo de oxigênio pode ser determinada de duas maneiras:

- Método parcial: utilizado em atividades leves e moderadas. A captação de oxigênio em estado permanente é igual a necessidade após um curto período de trabalho.
- Método integral: utilizado em atividades pesadas de curta duração. A necessidade de oxigênio é superior em longo prazo. Durante o desenvolvimento de um trabalho pesado, a necessidade de oxigênio supera a captação.

A taxa metabólica é determinada medindo-se o consumo de oxigênio. A energia equivalente (EE) de oxigênio é utilizada para converter a taxa de consumo de oxigênio em taxa metabólica (ISO 8996 [2004]), e é determinada de acordo com a equação (33):

$$EE = (0,23.RQ + 0,77).5,88 \quad (33)$$

onde:

EE = energia equivalente, em Watt horas por litro de oxigênio (W.H/l O₂);

RQ = quociente respiratório, adimensional.

O quociente respiratório é dado pela razão entre a taxa de produção de dióxido de carbono e a taxa de consumo de oxigênio, conforme a equação (34):

$$RQ = \frac{V_{\dot{CO}_2}}{V_{\dot{O}_2}} \quad (34)$$

onde:

$V_{\dot{CO}_2}$ = taxa de produção de dióxido de carbono, em litros de dióxido de carbono por hora;

$V_{\dot{O}_2}$ = taxa de consumo de oxigênio, em litros de oxigênio por hora.

Finalmente, a taxa metabólica, calculada pelo consumo de oxigênio, pode ser visualizada na equação (35):

$$M = EE.V_{\dot{O}_2} \cdot \frac{1}{A_{Du}} \quad (35)$$

O método 4.B, da água duplamente marcada, funciona a partir da ingestão de água marcada com isótopos de dois elementos químicos: deutério e oxigênio. O deutério é eliminado como água, enquanto o oxigênio é eliminado como água e dióxido de carbono. O volume de concentração de todos estes elementos na urina e no ar expirado permite o cálculo da demanda de energia (ISO 8996 [2004]).

O método 4.C, da calorimetria direta, mede o gasto energético no qual o calor é dissipado para o ambiente (BARROS et al., 2011). O calor é transferido através dos processos de condução, convecção, radiação e evaporação. A calorimetria direta é normalmente uma medida de todo o organismo, realizada dentro de câmaras (ISO 8996 [2004]).

Para todos os métodos apresentados, os principais fatores que afetam a acuracidade dos dados são (MALCHAIRE, 2004; ISO 8996 [2004]):

- Variabilidade Individual;
- Diferenças nos equipamentos de trabalho;
- Diferenças na velocidade de trabalho;
- Diferenças de técnica e habilidade ao realizar o método escolhido;
- Diferenças de gênero e características antropométricas;
- Diferenças culturais;
- Quando se utiliza tabelas, ocorrem diferenças entre observadores e seu nível.

De acordo com Xavier (2000), as formas mais adequadas para se determinar a taxa metabólica são através de medições, sejam, estas medições realizadas por calorimetria ou pelo consumo de oxigênio. Xavier (2000) ainda salienta que a utilização de valores tabelados de taxa metabólica pode acarretar em grandes erros de precisão, pois as tabelas apenas consideram o tipo de atividade executada, e não levam em conta características pessoais dos executores, tais como gênero e altura e também a maneira que a atividade é executada.

2.4 O MÉTODO DE NEWTON

O método de Newton envolve a utilização de derivadas para obter uma aproximação de um zero real de uma função diferenciável $f: R \rightarrow R$. É uma técnica de aproximações sucessivas de zeros reais (OLIVEIRA, 2007).

Se f é uma função diferenciável e se x_* é um zero real de f , então, x_k é uma aproximação de x_* . O princípio do método de Newton consiste em considerar, que a solução de $f(x)$ em um passo é um problema “difícil”. Então a solução para $f(x)$ irá se aproximando através de uma sequência de pontos $\{x_k\}$. Em cada aproximação x_k , constrói-se, com as informações disponíveis neste ponto, um problema “fácil” comparativamente ao problema original, cuja solução se pode encontrar. O valor atualizado x_{k+1} será a solução do problema “fácil”, o qual muda de uma iteração para a outra, e em geral, estes valores atualizados estarão cada vez mais próximos da solução do problema original, conforme figura 8:

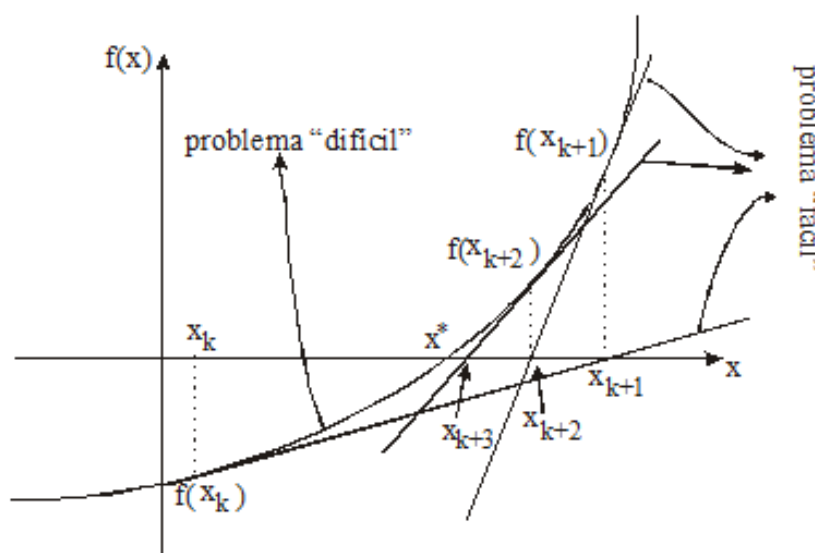


Figura 8 - Método de Newton: Convergência
Fonte: Oliveira (2007)

Considerando o desenvolvimento da série de Taylor até a derivada primeira de $f(x)$, em uma vizinhança do ponto atual x_k , se obtém a aproximação linear para $f(x)$ no ponto x_k .

Dessa forma, a aproximação x_{k+1} é dada pela equação (36) abaixo (SWOKOWSKI, 1994):

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)} \quad (36)$$

Deve-se ter atenção na escolha da primeira aproximação de x_0 . Se x_0 não está suficientemente próximo de x_* , é possível que a segunda aproximação x_1 seja pior ainda. Não se deve escolher um número x_k tal que $f'(x_k)$ esteja próximo de zero, visto que $f'(x_k)$ é o denominador na equação (36) e isto pode acarretar divergência no método de Newton.

3 METODOLOGIA

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa é de caráter descritivo exploratório. A metodologia é de natureza predominantemente quantitativa, em relação aos dados obtidos pelos equipamentos de medição (LAKATOS e MARCONI, 2001). Para Silva e Menezes (2001), essa é uma pesquisa aplicada, pois visa gerar conhecimentos novos e úteis, para o avanço da ciência e dirigidos para a solução de problemas específicos.

3.2 DESCRIÇÃO DA EMPRESA E DELIMITAÇÃO DO LOCAL DE TRABALHO

A empresa escolhida para o desenvolvimento desta pesquisa está localizada no Distrito Industrial de Ponta Grossa – PR e sua escolha se deu em razão da acessibilidade. A empresa é considerada do ramo metal-mecânico, oferecendo serviços de tratamento de superfícies baseados em revestimentos especiais, destinados à linha industrial, tendo como foco principal a linha de panificação. A planta da fábrica pode ser vista na figura 9:

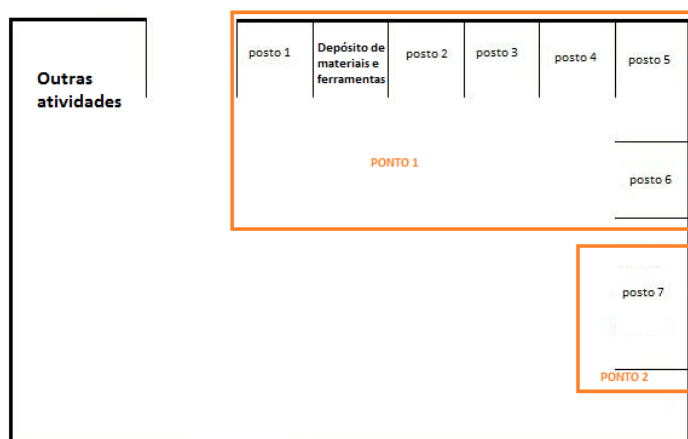


Figura 9 – Postos de trabalho da fábrica
Fonte: Autoria própria

A pesquisa deu-se em dois pontos de atividades da empresa. O ponto 1 foi na parte de metalurgia, onde ocorre a fabricação de caixas metálicas para baterias tracionárias. Esta parte da empresa é composta por uma linha de produção em forma de “L”, sendo composta por 6 postos de trabalho distintos, sendo que em cada

posto há um trabalhador. A caixa começa a ser montada no posto 1 e terminada no posto 6. Sendo assim, várias operações são realizadas em cada posto, mas todas estas operações envolvem atividades de solda.

O ponto 2 é onde se trabalha com formas de pão para a indústria alimentícia. Todos os substratos usados na fabricação de formas ou bandejas podem ser revestidos: aço carbono, aço aluminizado, aço inoxidável, flandres, bem como alumínio e suas ligas. O ponto 2 é composto por um posto de trabalho, totalizando três trabalhadores onde o trabalho é feito utilizando-se de uma solda, onde apenas um trabalhador executa as atividades. Esta pesquisa, portanto, analisou o trabalho dos soldadores dessa indústria, coletando dados em todos os postos de trabalho e de todas as pessoas envolvidas no ambiente.

3.3 PROCEDIMENTOS DE COLETA DE DADOS

As medições foram realizadas no período de setembro de 2012 a janeiro de 2013, nos turnos da manhã e da tarde. Durante o pleno desenvolvimento das atividades dos profissionais, foram coletados os dados ambientais e pessoais. Os dados ambientais, que incluem a temperatura do ar, velocidade do ar, temperatura do globo e umidade relativa, necessários para a determinação da taxa metabólica calculada e também para o cálculo do PMV, foram gravados pelo aparelho *Confortímetro Sensu®*, em intervalos de 1 em 1 minuto. O aparelho foi colocado no interior de cada posto de trabalho, próximo ao operador, rodando pelos sete postos de trabalho utilizados nesta pesquisa. O equipamento (figura 10) foi posicionado de acordo com a ISO 7726 (1998): altura de 1,10 m.



Figura 10 – Confortímetro Sensu®
Fonte: Autoria própria

Antes de se iniciar as medições, o aparelho era montado para que este entrasse em equilíbrio com o ambiente, por um tempo de 20 minutos. A medição era realizada por um tempo de 40 minutos, totalizando o tempo total de 1 hora por posto de trabalho. Ao fim de uma hora, o aparelho havia gravado 40 dados das variáveis ambientais. Para efeitos de utilização dos dados, foi realizada a média dos 40 dados.

Foram realizadas 31 medições. Após a análise destes dados, procedeu-se ao cálculo do tamanho da amostra, para saber se as 31 medições são suficientes ou se é necessário coletar mais dados. Para cada variável ambiental calculou-se também o desvio-padrão, variável necessária para calcular o tamanho da amostra. De acordo com Triola (2005), o tamanho da amostra é dado pela equação (37):

$$n = \left(\frac{z_{\frac{\alpha}{2}} \cdot \sigma}{E} \right)^2 \quad (37)$$

onde:

n = tamanho da amostra;

$\frac{z_{\alpha}}{2}$ = valor crítico da distribuição normal padronizada;

σ = desvio-padrão;

E = margem de erro.

Em se tratando da obtenção da taxa metabólica real, foi utilizado o analisador metabólico VO2000®. Antes do uso, porém, foi necessário deixar o equipamento ligado por 30 minutos para calibração. O aparelho pode ser visto na figura 11:



Figura 11 – Analisador Metabólico VO2000®
Fonte: Autoria própria

O analisador metabólico consiste em uma máscara que possui um tubo, por onde a pessoa deve respirar. O fio que sai do tubo e é ligado ao analisador é muito curto, fazendo com que o equipamento tenha que estar ao lado da pessoa, não permitindo a ela, quase nenhuma mobilidade.

Como este trabalho também executou o cálculo do PMV foi necessário coletar as variáveis ambientais, através do Confortímetro e as variáveis pessoais através de um questionário, que durante as medições, os trabalhadores eram convidados a preencher. O questionário (Xavier, 2000) está disponível no Anexo A.

3.4 DETERMINAÇÃO DA TAXA METABÓLICA CALCULADA ($M_{\text{CALCULADO}}$)

3.4.1 O Método de Newton para obtenção da taxa metabólica calculada

No caso em estudo deve-se determinar M para um dada Sensação Térmica, utilizando a equação (26). Esta pode ser resolvida por métodos numéricos. Um problema encontrado para se determinar M para (26) é que a grandeza t_{cl} , necessária para o cálculo de M dado na função, é ela própria uma função de M como pode ser observado, retornando-se a equação (15), reescrita abaixo (ISO 7730 [2005]):

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028M - 0,155 \cdot I_{cl} \cdot \{ 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{rm} + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \} \quad (15)$$

O t_{cl} quando calculado pela equação (15), fornecido o M , é resolvido por algum método numérico iterativo. Diante da impossibilidade da solução analítica do problema (26), propõe-se solucioná-lo utilizando a regressão linear obtida entre a taxa metabólica (M) e a temperatura da superfície da vestimenta (t_{cl}).

Fazendo-se uso dos dados das variáveis ambientais e pessoais do conforto térmico, determina-se uma função de t_{cl} dependente de M , ou seja, $t_{cl} = f(M)$. Partindo-se da regressão não linear $t_{cl} = f(M)$, é possível substituir as grandezas dependentes do t_{cl} na função (26). Depois da substituição de todas estas grandezas, (26) torna-se função da taxa metabólica, e as outras variáveis da equação são conhecidas. Partindo-se, então, da equação (26) resolve-se o

problema numericamente, visto que uma solução analítica não é possível. Modificando-se (26) para sua solução tem-se uma equação (38):

$$F(M) = [0,303 \cdot \exp.(-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot L - PMV \quad (38)$$

Uma possibilidade é aplicar o método de Newton para calcular o zero da função dada em (38), ou seja, determinar M tal que $F(M) = 0$. Aplicando-se o método de Newton tem-se o seguinte algoritmo:

ALGORITMO 1

Dados $f: R \rightarrow R$ duas vezes diferenciável, $M^0 \in R$, arbitrário, $\varepsilon > 0$, por exemplo, $\varepsilon = 10^{-4}$ em cada iteração k , resolver para $k = 0, 1, 2, \dots$

enquanto $|f(M_k)| > \varepsilon$, repetir

1. $M_{k+1} = M_k - \frac{f(M_k)}{f'(M_k)}$
2. Fazer $k=k+1$ e voltar ao passo 1

Para iniciar o Método utiliza-se um valor da taxa metabólica pertencente ao intervalo em que se aplica o modelo do PMV, ou seja, de 46 a 232 W/m².

3.4.2O Método de Newton para Determinação da Regressão Não-Linear Cúbica entre a taxa metabólica e a temperatura de superfície da vestimenta

O principal problema encontrado para se calcular a taxa metabólica de cada atividade, encontra-se na variável t_{cl} (temperatura da superfície da vestimenta). A equação do t_{cl} possui esta variável nos dois membros da igualdade, sendo um deles um polinômio de quarto grau, impossibilitando desta forma que esta grandeza seja isolada. Além disso, como se deseja calcular a taxa metabólica, não se possui o valor de M , não havendo dessa forma possibilidade para executar o cálculo.

Uma solução proposta neste trabalho é a utilização da regressão não-linear entre a taxa metabólica (M) e a temperatura da superfície da vestimenta (t_{cl}). Para a

equação de regressão $t_{cl} = f(M)$, esta pesquisa utilizou-se do método matemático de Newton para a determinação do t_{cl} , conforme figura 12:

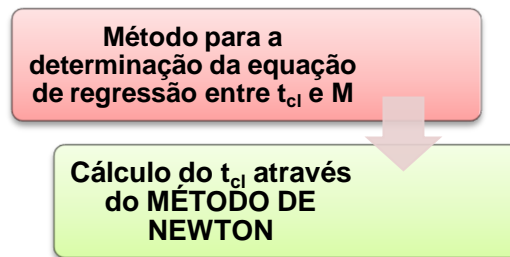


Figura 12 - Método para a determinação da equação de regressão entre t_{cl} e M
 Fonte: Autoria própria

A norma ISO 7730 (2005) fornece uma sugestão de valor inicial para o t_{cl} , como mostrado na equação (39) abaixo:

$$t_{cl} = t_{ar} + \frac{(35,5 - t_{ar})}{3,5 \cdot I_{cl} + 0,1} \quad (39)$$

Como os dados de temperatura do ar e isolamento da vestimenta são conhecidos, é possível começar o método iterativo com um valor para o t_{cl} . Dessa forma, o valor encontrado de t_{cl} é substituído na equação (15), obtendo-se um novo valor. Com o novo valor é calculado a média aritmética simples, e esse valor é novamente substituído na equação (15). O programa executa esses passos até encontrar a convergência, ou seja, os valores de t_{cl} nos dois lados da equação são iguais.

Como se deseja calcular a taxa metabólica, a determinação do t_{cl} é importante, visto que a taxa metabólica é calculada pela equação do modelo do PMV. Dessa forma, precisam-se dos valores de t_{cl} para se obter a equação de regressão não-linear cúbica, que substituirá todos os campos de t_{cl} na equação do modelo do PMV, uma vez que $t_{cl} = f(M)$.

3.5 ANÁLISE DOS VALORES DE TAXA METABÓLICA OBTIDOS

Este trabalho determinou dois valores diferentes para a taxa metabólica: um valor calculado, utilizando-se do Método de Newton e um valor real, utilizando-se o

analisador metabólico VO2000. Cada um desses valores vai gerar um valor de PMV. Como o objetivo desta pesquisa é melhorar o modelo do PMV diminuindo-se as imprecisões da taxa metabólica, calculou-se também um PMV utilizando-se da taxa metabólica tabelada da ISO 8996 (2004), conforme mostra a figura 13:

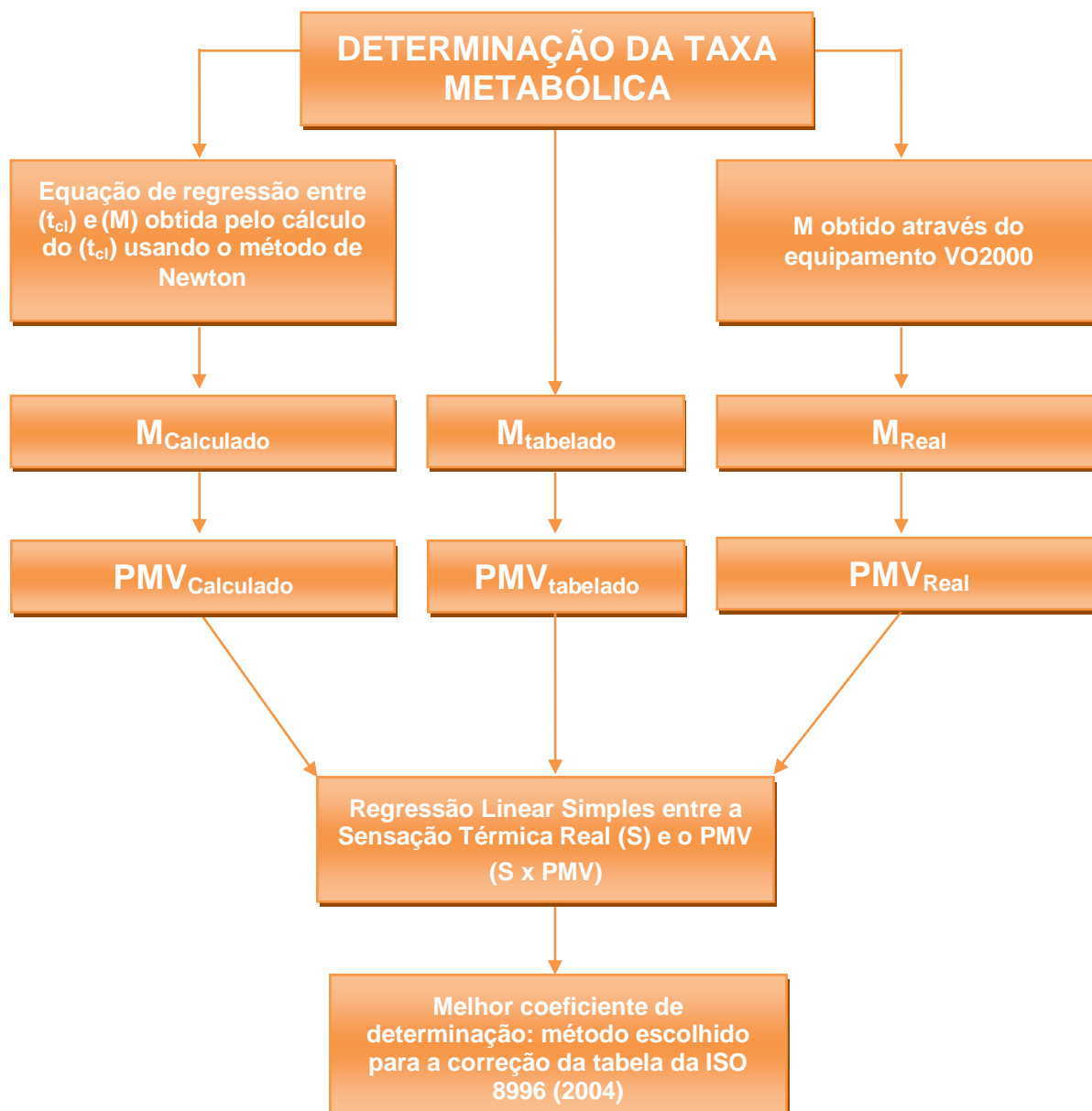


Figura 13 – Determinação de M
Fonte: Autoria própria

A fim de verificar qual dos valores de taxa metabólica mais aproximou o modelo do PMV com a sensação térmica real, foi realizada a análise de regressão linear simples de três formas:

- a) Sensação térmica real como variável dependente e PMV_{tabelado} como variável independente, este obtido através dos valores da taxa metabólica tabelada da ISO 8996 (2004);
- b) Sensação térmica real como variável dependente e $PMV_{\text{calculado}}$ como variável independente, este obtido através da taxa metabólica calculada e,
- c) Sensação térmica real como variável dependente e PMV_{real} como variável independente, este obtido através da taxa metabólica obtida pelo equipamento VO2000®.

O método que apresentou o maior coeficiente de determinação foi o escolhido para a correção da tabela da ISO 8996 (2004).

3.6 PASSOS PARA A CORREÇÃO DA TABELA ISO 8996 (2004)

Os valores determinados para a taxa metabólica, conforme dispostos na norma ISO 8996 (2004), são genéricos e, consequência disso, não representam a realidade. O fato que ocorre é que os valores de sensação térmica obtidos em estudo de campo, não são coerentes aos valores de PMV apresentados na norma. Segundo Xavier (2000), esta diferença pode estar relacionada a valores incorretos de taxa metabólica utilizados.

Para corrigir a tabela da norma ISO 8996 (2004) é preciso seguir alguns passos. O primeiro passo é fazer uma comparação entre os valores obtidos de forma calculada e os valores obtidos pelo analisador metabólico. O resultado da comparação forneceu um $M_{\text{corrigido}}$. Este valor foi utilizado para fazer uma comparação com os valores tabelados da norma, obtendo dessa forma o M_{predito} , com a equação de correção para os valores tabelados.

A figura 14 abaixo mostra os passos que foram realizados para obtenção da função de correção:



Figura 14 – Passos realizados para encontrar a função de correção para a tabela da norma ISO 8996 (2004)
Fonte: Autoria própria

Depois de encontrada a função M_{predito} , é possível determinar novos valores de taxa metabólica tendo como base os valores tabelados. Com a obtenção dos novos valores de taxa metabólica e a utilização das variáveis ambientais é possível

determinar o PMV_{predito} . Este PMV será relacionado com a sensação térmica real dos trabalhadores através de regressão linear simples, conforme mostra figura 15:



Figura 15 – Passos realizados para verificar se ocorrem melhorias no modelo do PMV
Fonte: Autoria própria

Através da análise de regressão será possível verificar se existe melhoria no modelo do PMV , ou seja, o coeficiente de determinação obtido da função $S \times PMV_{\text{predito}}$ é melhor que o coeficiente de determinação de $S \times PMV_{\text{tabelado}}$.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS

4.1 OBTENÇÃO DO $M_{\text{calculado}}$

4.1.1 Coleta de dados

As medições foram realizadas durante o desenvolvimento das atividades pelos colaboradores. Foram realizadas, ao todo, 31 medições, rodando pelos 7 postos de trabalho. As médias de cada uma das medições pode ser vista no apêndice B. A tabela 1 abaixo apresenta a média das 31 medições:

Tabela 1 – Valores das médias das variáveis ambientais

	Temperatura do Ar (°C)	Velocidade do Ar (m/s)	Temperatura de Globo (°C)	Umidade Relativa (%)
MÉDIA	22,47	0,10	22,58	72,13
DESVIO	1,88	0,09	2,07	16,40

Fonte: Autoria própria

Aplicando-se a equação (37) para cada variável, é possível se obter o tamanho da amostra. Foi calculado o tamanho da amostra para cada variável (considerando um nível de significância de 5%), sendo que o tamanho da amostra a ser selecionado deverá ser o maior valor encontrado. A tabela 2 apresenta estes valores:

Tabela 2 – Cálculo do tamanho da amostra

	Temperatura do Ar (°C)	Velocidade do Ar (m/s)	Temperatura de Globo (°C)	Umidade Relativa (%)
Valor Crítico	1,96	1,96	1,96	1,96
Desvio-Padrão	1,88	0,09	2,07	16,40
Margem de Erro	1	0,05	1	6
Tamanho da amostra	14	12	16	29

Fonte: Autoria própria

Como nenhum valor foi superior a 30, a amostra inicial de 31 medições coletadas já é suficiente para a execução da pesquisa. Este estudo também procedeu a coleta de duas outras variáveis: o isolamento térmico da vestimenta

(cujos índices numéricos estão presentes nas tabelas da ISO 9920 [2007]) e a sensação térmica real dos trabalhadores, essenciais para a obtenção da taxa metabólica. O procedimento de coleta foi basicamente o mesmo: durante o desenvolvimento das atividades, foram coletados os dados em todos os postos. Para cada medição, há também um valor de isolamento térmico da vestimenta e sensação térmica, sendo apresentado na tabela 3 o valor das médias:

Tabela 3 – Isolamento da Vestimenta e Sensação Térmica

	I_{cl} (clo)	Sensação Térmica
MÉDIA	0,59	1,05
DESVIO	0,08	0,97

Fonte: Autoria própria

Com todos os dados coletados, é possível calcular a taxa metabólica, pela regressão não-linear cúbica utilizando a taxa metabólica e a temperatura de superfície da vestimenta, isto abordado no próximo item.

4.1.2 Determinação da equação não-linear cúbica entre a taxa metabólica e temperatura de superfície da vestimenta

Antes de se determinar a equação, é necessário calcular a temperatura de superfície da vestimenta. Para o cálculo do t_{cl} , porém, são necessárias as outras variáveis, como temperatura do ar, temperatura radiante média, taxa metabólica e isolamento térmico da vestimenta. Para estas variáveis, com exceção da taxa metabólica, foram utilizadas as médias dos quadros 13 e 14. Para a taxa metabólica, é verificado na norma ISO 8996 (2004), que de acordo com a atividade, a taxa metabólica varia entre 40 e 410 W/m². Porém, para se utilizar o modelo do PMV, a taxa metabólica deve variar entre 46 e 232 W/m². O t_{cl} foi então calculado utilizando alguns dos valores contidos na ISO 8996 (2004) do intervalo citado acima. Esta pesquisa adotou, por escolha, utilizar dos valores entre o intervalo de 46 e 232 W/m² apenas aqueles que estão contidos em alguma atividade. A figura 16 mostra a execução do cálculo:

```
Shortcuts [?] How to Add [?] What's New
DESEJA UTILIZAR DADOS DA SESSÃO ANTERIOR?<S/N>N
DADOS =
*** DADOS DE ENTRADA DO PROGRAMA PMV E PPD###6 VARIÁVEIS ***
1 ENTRE COM A TEMPERATURA DO AR ----- ta = 22.47
2 ENTRE COM A TEMPERATURA RADIANTE ----- tr = 22.65
3 ENTRE COM A VELOCIDADE DO AR ----- va = 0.1
4 ENTRE COM A HUMIDADE RELATIVA ----- UR = 72.13
5 ENTRE COM A TAXA METABOLICA (transformada ou nao) M = 46
6 ENTRE COM ISOLAMENTO TERMICO CLO ----- ICL = 0.59
```

Figura 16 – Cálculo do t_{cl} pelo Método de Newton
Fonte: Autoria própria

Dessa forma, cada valor de M gera um t_{cl} diferente. A tabela 4 abaixo mostra os valores encontrados:

Tabela 4 – Relação entre M e t_{cl}

M	t_{cl}
46	29,09
55	28,96
70	28,37
100	27,43
110	27,18
115	27,06
135	26,63
140	26,53
165	26,06
180	25,81
185	25,73
200	25,50
210	25,35
230	25,07
232	24,80

Fonte: Autoria própria

De posse desses dados, foi feito o gráfico entre essas duas variáveis, de onde foi possível obter a equação (40) que relaciona estas duas variáveis, por meio da regressão não-linear cúbica, conforme gráfico 1 abaixo:

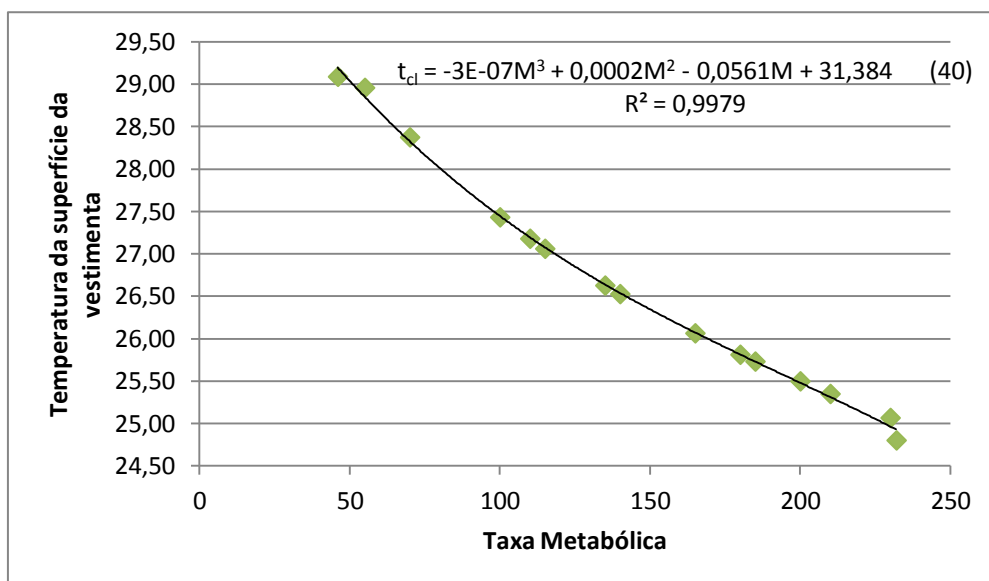


Gráfico 1 – Equação de regressão cúbica entre M e t_{cl}

Fonte: Autoria própria

A equação encontrada acima será substituída no modelo matemático da equação (38), em todos os campos que aparecerem a variável t_{cl}. Isto possibilitará a aplicação do método de Newton para a determinação da taxa metabólica, descrito no próximo item.

4.1.3 Determinação do M_{calculado} utilizando-se o método de Newton

Utilizando-se do Método de Newton foi calculado o valor da taxa metabólica utilizando-se do programa elaborado para este fim. De forma análoga ao cálculo do t_{cl}, entra-se com os dados no programa. A figura 17 abaixo mostra o cálculo para a medição 11, por exemplo:

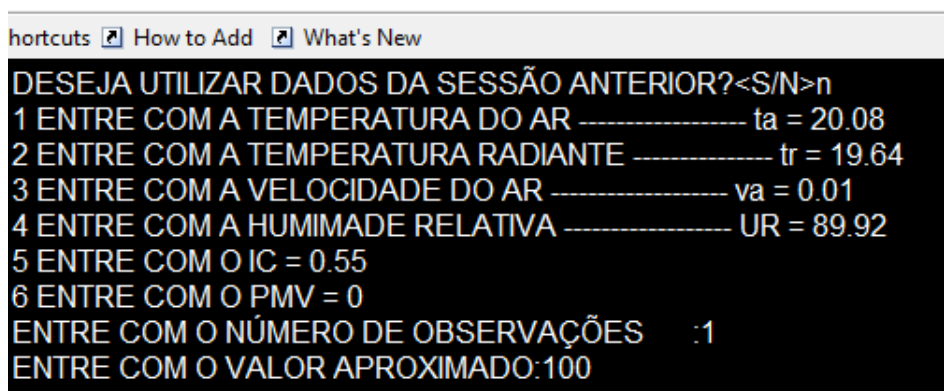


Figura 17 – Entrada de dados para o cálculo da taxa metabólica da medição 11

Fonte: Autoria própria

Depois que se entra com os dados e com um valor aproximado para que o programa busque a solução, encontra-se a resposta conforme mostra a figura 18 abaixo:

```

VALOR =
  177.3969

PMV =
  0.6060

PPD =
  12.7014

>> cont
cont =
  5

>> fvk
fvk =
  0

```

Figura 18 – Cálculo de M para a medição 11
Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado na figura acima, o “VALOR” é a taxa metabólica. O programa também calcula o PMV e o PPD. O “cont” significa o número de iterações que o programa teve que fazer para encontrar o zero da função. O “fvk”, que é igual a zero, significa a convergência. O procedimento de cálculo foi realizado para todas as medições, conforme tabela 5:

Tabela 5 – Valores da Taxa Metabólica Calculada com respectivo PMV

Medição	M (W/m ²)	PMV
1	221,63	1,79
2	260,07	2,92
3	230,92	2,04
4	242,33	2,08
5	147,18	0,82
6	186,42	2,09
7	166,49	1,04
8	262,02	2,97
9	193,39	0,98
10	136,07	1,30
11	177,40	0,61

12	194,73	1,25
13	139,67	0,34
14	82,30	-0,68
15	79,07	-0,32
16	162,52	0,49
17	220,85	2,36
18	64,07	-1,04
19	262,60	2,04
20	291,48	2,48
21	237,89	1,86
22	187,75	1,31
23	181,17	1,02
24	119,51	0,44
25	206,44	2,14
26	61,49	-0,63
27	66,08	-1,23
28	110,85	-0,08
29	226,61	1,69
30	213,48	1,54
31	205,10	1,45
MÉDIA	178,63	1,13
DESVIO	64,41	1,13

Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado no quadro 16 acima, a média da taxa metabólica calculada para o soldador foi de 178,63 W/m², diferente do intervalo de valores que a norma ISO 8996 (2004) sugere: 75 a 125 W/m². Porém, por se tratar de um método matemático e o valor encontrado estar fora do intervalo, é necessário um valor real para comparação, com o objetivo de saber se o método é eficaz ou não para o cálculo da taxa metabólica.

4.2 OBTENÇÃO DO M_{REAL}

4.2.1 Coleta de dados

As medições foram realizadas através do analisador metabólico VO2000. Foram realizadas 31 medições, de 10 minutos cada, também rodando por todos os postos de trabalho já descritos anteriormente. O principal problema encontrado para

se trabalhar com o analisador metabólico foram os fios, que conectam o equipamento ao tubo que é colocado na pessoa, para que esta faça a respiração.

O fio é curto e, dessa forma, o equipamento ficava próximo ao funcionário. Uma justificativa para deixar o equipamento medindo apenas 10 minutos, é que o analisador não protege dos respingos e fumos, gerados pelo processo da solda. A figura 19 mostra o analisador metabólico sendo utilizado em estudo de campo.



Figura 19 – Analisador Metabólico em situação de trabalho
Fonte: Autoria própria

A grande vantagem observada em se utilizar o analisador metabólico é que este fornece de forma imediata o valor da taxa metabólica (em met), não havendo a necessidade de se executar nenhuma operação matemática. Toda vez que se vai iniciar uma nova medição, deve-se cadastrar um paciente com seu peso e altura. O equipamento fornece, além da taxa metabólica, os valores de RQ, VO_2 e VCO_2 , na unidade de medida que se deseja trabalhar. Assim, o equipamento utiliza-se da equação (35) e fornece a taxa metabólica. A figura 20 mostra o *layout* do *software* que o analisador metabólico utiliza para executar os cálculos:

VCO2 (mL/min)	RQ	VO2 (L/min)	VO2 (mL/kg/min)
690	0.93	0.69	0.74
662	0.94	0.66	0.70
652	0.93	0.65	0.70
672	0.91	0.65	0.72
692	0.90	0.67	0.74
712	0.89	0.69	0.78
676	0.89	0.71	0.80
726	0.90	0.68	0.75
724	0.89	0.73	0.81
702	0.91	0.72	0.80
694	0.92	0.70	0.77
650	0.90	0.66	0.74
642	0.91	0.67	0.74

Figura 20 – Formato de apresentação dos dados
Fonte: Autoria própria

4.2.2 Determinação do M_{real}

O analisador metabólico fornece os dados instantaneamente. Como os valores da taxa metabólica são dados pelo equipamento em met, utilizou-se o fator de conversão de 58,2 W/m² para transformar a unidade. Os valores podem ser visualizados no quadro 17 abaixo, que também já apresenta os valores do PMV. Para calcular o PMV mostrado na tabela 6, foi necessário coletar todas as variáveis ambientais, que estão disponíveis no Apêndice C.

Tabela 6 – Valores da Taxa Metabólica Real com respectivo PMV

Medição	M (met)	M (W/m ²)	PMV
1	2,47	143,75	1,04
2	2,93	170,53	1,54
3	2,81	163,54	1,41
4	2,58	150,16	1,15
5	2,73	158,89	1,32
6	2,79	162,38	1,48
7	2,83	164,71	1,49
8	2,79	162,38	1,32
9	2,67	155,39	1,16
10	2,53	147,25	1,05
11	2,62	152,48	1,22
12	2,26	131,53	0,85
13	2,52	146,66	1,03
14	2,43	141,43	1,15
15	2,51	146,08	1,39

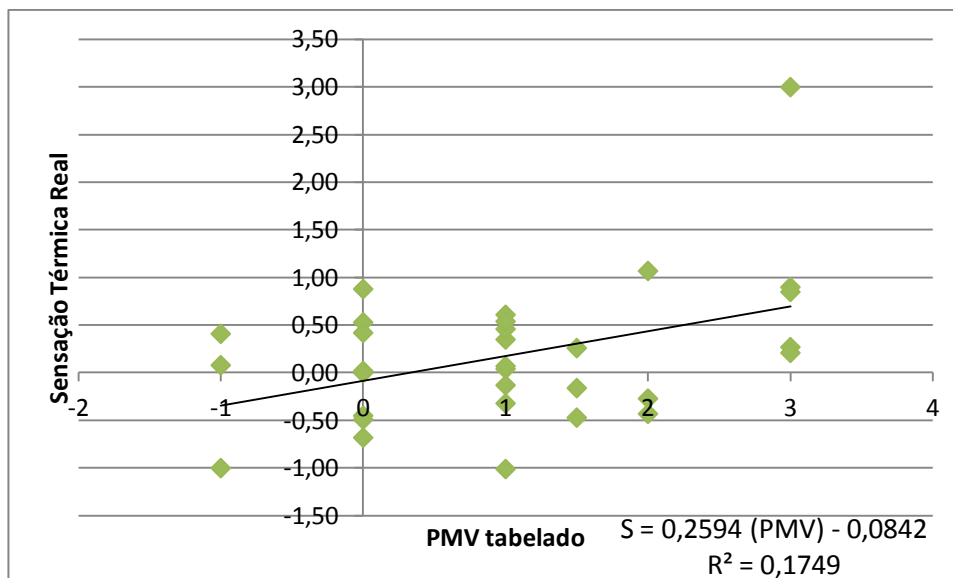
16	2,78	161,80	1,53
17	2,72	158,30	1,64
18	2,60	151,32	1,69
19	2,82	164,12	1,99
20	1,93	112,33	1,01
21	2,10	122,22	1,20
22	1,97	114,65	0,91
23	1,56	90,79	0,58
24	1,73	100,69	0,68
25	2,98	173,44	1,98
26	1,63	94,87	0,51
27	2,40	139,68	1,30
28	2,53	147,25	1,54
29	2,70	157,14	1,71
30	2,53	147,25	1,52
31	3,03	176,35	2,06
MÉDIA	2,50	145,46	1,30
DESVIO	0,39	22,61	0,39

Fonte: Autoria própria

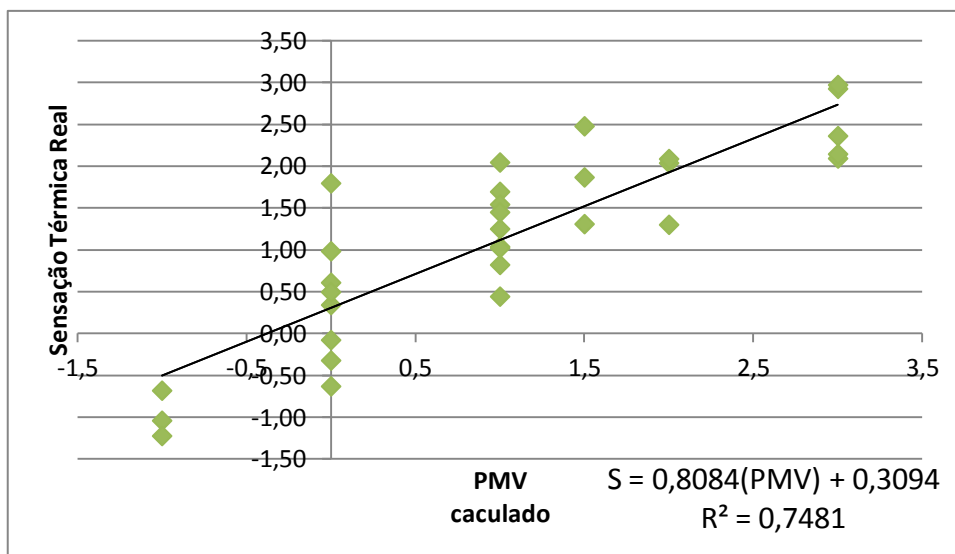
Também pode ser verificado na tabela 6 acima, que a média da taxa real obtida pelo analisador metabólico para o soldador foi de 145,46 W/m², diferente do intervalo de valores que a norma ISO 8996 (2004) sugere: 75 a 125 W/m².

4.3 REGRESSÃO LINEAR ENTRE A SENSACÃO TÉRMICA REAL E O PMV

Para a obtenção do PMV, além da taxa metabólica, outras variáveis também são necessárias. Estas foram coletadas e também utilizadas para a execução do cálculo. O gráfico 2 abaixo mostra a relação obtida entre a sensação térmica real e o PMV_{tabelado}, apresentando um coeficiente de determinação de 0,1749:



O gráfico 3 abaixo mostra a relação obtida entre a sensação térmica real e o $PMV_{\text{calculado}}$, apresentando um coeficiente de determinação de 0,7481:



O gráfico 4 abaixo mostra a relação obtida entre a sensação térmica real e o PMV_{real} , apresentando um coeficiente de determinação de 0,7854:

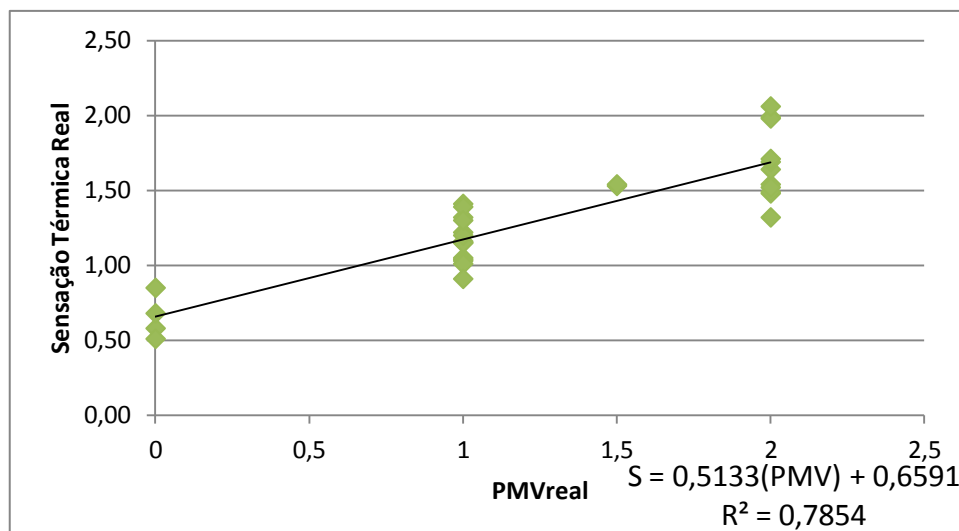


Gráfico 4 – S x PMV_{real}
Fonte: Autoria própria

O coeficiente de determinação entre a Sensação Térmica Real e o PMV_{tabelado} foi de 0,1749, o que mostra uma baixa aderência entre os dados. Como pode ser verificado acima, as outras duas funções apresentaram um maior coeficiente de determinação sendo o maior de 0,7854, obtido pela relação entre a Sensação Térmica Real e o PMV_{real}.

Isso mostra que as duas formas para obtenção da taxa metabólica apresentam uma melhoria para o modelo do PMV. Apesar dos valores dos coeficientes de determinação estarem muito próximos, os valores de taxa metabólica que irão corrigir a tabela da ISO 8996 (2004) são os valores obtidos pelo analisador metabólico. Além disso, os dois coeficientes de determinação obtidos são razoáveis, visto que há um aumento significativo na aderência dos dados quando se compara a sensação térmica real com PMV_{tabelado}. A correção será executada no próximo item.

4.4 OBTENÇÃO DA FUNÇÃO DE CORREÇÃO (M_{predito})

A média dos valores calculados foi de 178,63 W/m² e média dos valores reais foi de 145,46 W/m². Para a obtenção da função $M_{\text{corrigido}}$, dividiu-se a média do valor real pela média do valor calculado, encontrando um coeficiente de 0,82. Esse coeficiente de 0,82 multiplica todos os valores calculados, para dessa forma obter a função $M_{\text{corrigido}}$, demonstrado na equação (41):

$$M_{\text{corrigido}} = 0,82 \times M_{\text{calculado}} \quad (41)$$

Com base na equação (41), todos os valores calculados da tabela 5 foram corrigidos, resultando assim na tabela 7:

Tabela 7 – Valores da Taxa Metabólica Calculada corrigidos pela Taxa Metabólica Real

Medição	M _{calculado}	M _{corrigido}
1	221,63	181,73
2	260,07	213,26
3	230,92	189,36
4	242,33	198,71
5	147,18	120,69
6	186,42	152,87
7	166,49	136,53
8	262,02	214,86
9	193,39	158,58
10	136,07	111,58
11	177,40	145,47
12	194,73	159,68
13	139,67	114,53
14	82,30	67,49
15	79,07	64,84
16	162,52	133,26
17	220,85	181,10
18	64,07	52,54
19	262,60	215,33
20	291,48	239,02
21	237,89	195,07
22	187,75	153,95
23	181,17	148,56
24	119,51	97,99
25	206,44	169,28
26	61,49	50,42
27	66,08	54,18
28	110,85	90,89
29	226,61	185,82
30	213,48	175,05
31	205,10	168,18
MÉDIA	178,63	146,48

Fonte: Autoria própria

Com os valores corrigidos, procedeu-se então para a correção da tabela. De acordo com a tabela da ISO 8996 (2004), a taxa metabólica dos soldadores varia entre 75 e 125 W/m². A média entre os valores da taxa metabólica tabelada é de 100 W/m² para o soldador e a média entre os valores corrigidos foi de 146,48 W/m². Dividindo-se a média dos valores corrigidos pela média dos valores tabelados, obtém-se o M_{predito} , na forma de equação de correção da tabela da norma ISO 8996 (2004), como mostra a equação (42):

$$M_{\text{predito}} = 1,4648 \times M_{\text{tabelado}} \quad (42)$$

De acordo com a equação (42), para as atividades de um soldador, os valores da apresentados da norma ISO 8996 (2004) devem ser multiplicados por 1,4648 para fazer a correção. O Quadro 19 abaixo apresenta os valores preditos para a atividade do soldador:

Tabela 8 – Valores da Taxa Metabólica Preditada para a atividade do soldador

M_{tabelado}	M_{predito}
75	109,86
80	117,18
85	124,51
90	131,83
95	139,16
100	146,48
105	153,80
110	161,13
115	168,45
120	175,78
125	183,10

Fonte: Autoria própria

Conforme pode ser verificado na tabela 8, o intervalo para as atividades do soldador varia entre 109,86 e 183,10 W/m², diferindo portanto do intervalo tabelado pela norma ISO 8996 (2004), que varia de 75 a 125 W/m². Deste modo, verifica-se que é recomendável a aplicação de um coeficiente de correção da ordem de 1,4648 sobre os valores tabelados, pois desta maneira a probabilidade de que os valores estejam mais compatíveis com a realidade é significativamente aumentada.

Com o intuito de verificar se os valores preditos de taxa metabólica melhoram o modelo do PMV, utilizou-se das variáveis ambientais e destes valores preditos para a determinação do PMV_{predito} . Utilizando-se das variáveis ambientais do Apêndice A e B e do intervalo da taxa metabólica da tabela 8, foi calculado o PMV_{predito} . A tabela 9 apresenta o PMV_{predito} e sensação térmica relatada pelos trabalhadores:

Tabela 9 – Valores do PMV_{predito} para a atividade do soldador

Sensação	PMV_{predito}
-1	0,32
1	0,86
0	0,44
0	0,28
1	0,64
2	1,43
1	0,58
1	1,06
1	0,15
2	1,59
0	0,25
1	0,68
1	0,74
1	0,83
1,5	1,29
0,5	0,6
2	1,41
1	1,02
0	0,47
0	0,44
1	0,76
1	1,14
1	0,97
2	1,49
2	1,74
2	1,76
1	1,29
1,5	1,34
2	1,26
2	1,39
2	1,49

Fonte: Autoria própria

Com os valores da sensação térmica e do PMV_{predito} , foi possível realizar a regressão linear, conforme mostra o gráfico 5:

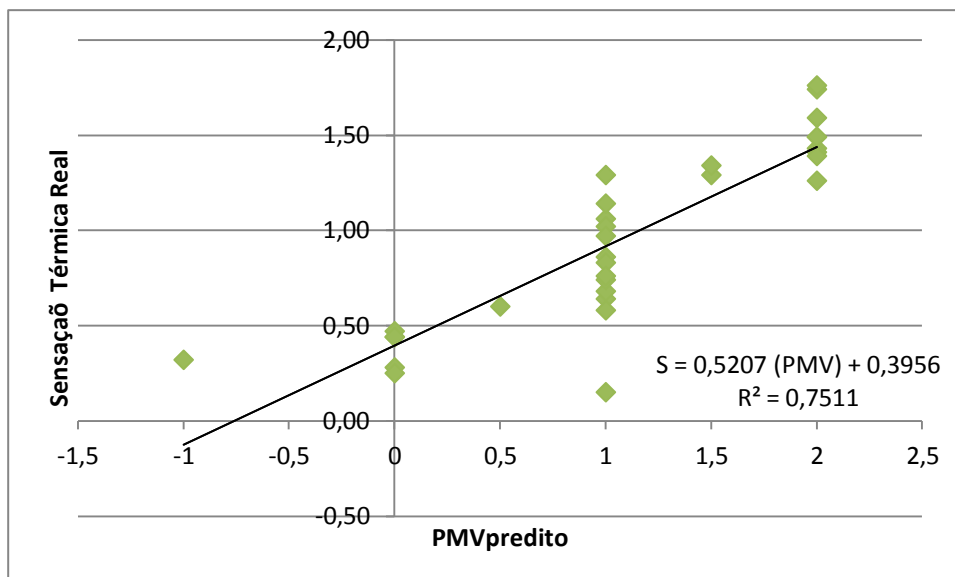


Gráfico 5 – S x PMV_{predito}
Fonte: Autoria própria

O coeficiente de determinação entre a Sensação Térmica Real e o PMV_{predito} foi de 0,7511, o que representa uma boa aderência entre os dados. Como pode ser verificado acima, há um aumento significativo na aderência dos dados quando se compara a sensação térmica real com o PMV_{predito} , frente aos valores tabelados (S x PMV_{tabelado}).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através dos estudos de campo, analisando-se os resultados da sensação térmica real e do respectivo PMV, observa-se que os valores tabelados da taxa metabólica, quando analisados com a sensação térmica real, apresentam baixa aderência dos dados, sendo assim a taxa metabólica tabelada um possível indicador para o baixo coeficiente de determinação encontrado.

Quando a taxa metabólica é calculada através das variáveis ambientais e pessoais ou medida pelo analisador metabólico e realiza-se o confronto de dados entre a sensação térmica real e o PMV, observa-se um aumento significativo na aderência destes dados, mostrando desta forma que uma correta determinação de valores para a taxa metabólica é essencial para o cálculo do PMV, para que haja melhoria do modelo.

O objetivo geral desta pesquisa foi atingido, na medida em que, através da relação entre a sensação térmica real e o PMV_{predito} , obteve-se um coeficiente de determinação de 0,7511, valor muito superior quando se relaciona a sensação térmica com o PMV_{tabelado} . Verifica-se, então, melhoria no modelo do PMV.

Pode-se dizer que os objetivos específicos estipulados para esta pesquisa foram alcançados, conforme a descrição abaixo:

- Propor equações de correção para os valores tabelados: através do método de Newton utilizado para o cálculo da taxa metabólica e do analisador metabólico VO2000, que fornece o valor real, foi possível propor uma equação de correção para a taxa metabólica.

O método de Newton forneceu o valor de 178,63 W/m² enquanto o analisador metabólico forneceu o valor de 145,46 W/m². A correção se dá pelo coeficiente de correção de 0,82, que multiplica todos os valores calculados.

Verificou-se que os dois valores obtidos não se enquadram no intervalo que a norma ISO 8996 (2004) afirma para a atividade dos soldadores (75 a 125 W/m²). Salienta-se que, apesar do refinado método matemático aplicado para o cálculo da taxa metabólica, existe a necessidade de uma comparação com um valor real, para verificar se os valores encontrados são condizentes com a realidade, o que para

esta pesquisa prova que o método desenvolvido apresenta alta eficiência para determinar valores calculados de taxa metabólica.

Como a média entre os extremos das atividades dos soldadores é 100 W/m², utilizou-se este valor para encontrar o M_{predito} , que corrige a tabela da norma ISO 8996 (2004). A média encontrada dos valores corrigidos foi de 146,48 W/m². Dessa forma, recomenda-se que para as atividades de um soldador, os valores da norma devem ser multiplicados pelo coeficiente de correção, que vale 1,4648.

- Determinar um método matemático para encontrar um valor calculado para a taxa metabólica ($M_{\text{calculado}}$): o principal problema começa na variável t_{cl} , que não é conhecida, e neste trabalho também não se conhecia o valor da taxa metabólica. A solução encontrada foi elaborar um programa matemático onde se pudesse determinar, primeiro os valores de t_{cl} , com base no modelo de PMV, para que fosse possível obter a função $t_{\text{cl}} = f(M)$.

A obtenção dessa função foi essencial, pois através dela substitui-se na equação do modelo do PMV todos os campos onde se encontrava o t_{cl} , fazendo com que todas as outras variáveis fossem conhecidas. Neste caso considerou-se o PMV como sendo a sensação térmica real dos trabalhadores, coletadas em estudo de campo. Desta forma, foi possível determinar todos os valores calculados para a taxa metabólica com precisão, garantido pelo Método de Newton.

- Determinar o valor real da taxa metabólica (M_{real}): a utilização do analisador metabólico para a determinação real da taxa metabólica foi um grande diferencial deste trabalho, pois o analisador permitiu comparar o valor calculado com o valor real.

Este equipamento fornece de forma imediata o valor da taxa metabólica, facilitando bastante para efeitos de comparação. O principal impedimento é que o fio que ligava o analisador à pessoa era muito curto, então o equipamento ficava próximo do trabalhador e seus movimentos eram limitados. Devido à colaboração das pessoas da fábrica, foi possível utilizar este equipamento, pois em um primeiro momento pensou-se que este equipamento poderia trazer alguma situação constrangedora para os trabalhadores, devido ao fato de o colaborador necessitar colocar uma máscara e ficar respirando através de um tubo.

- Verificar o ajuste do PMV e sensação térmica real utilizando a taxa metabólica: depois de determinados os valores para a taxa metabólica calculada e real, procedeu-se ao cálculo do PMV. Após se obter o PMV calculado e real, foram

realizadas duas regressões lineares simples para verificar qual das duas maneiras mais se aproximou do modelo do PMV.

A regressão linear entre a sensação térmica, coletada em estudo de campo, e o $PMV_{\text{calculado}}$ apresentou coeficiente de determinação de 74,81%, e a regressão linear entre a sensação térmica e o PMV_{real} , apresentou coeficiente de determinação de 78,54%. Cabe aqui falar novamente do método matemático desenvolvido nesta pesquisa: o bom coeficiente de determinação entre a sensação térmica e o PMV demonstra que o método é eficiente para executar o cálculo da taxa metabólica e ainda, não apresentou diferença significativa em relação aos resultados da regressão linear entre a sensação térmica e o PMV_{real} . Dessa forma, a equação de correção para os valores tabelados da norma poderia ter sido ajustada pelos valores calculados, ou seja, na falta de um analisador metabólico, pode-se corrigir a tabela apenas com o valor calculado, utilizando o método matemático desenvolvido neste trabalho.

Esta pesquisa trabalhou com soldadores do ramo metal-mecânico. Portanto, os resultados aqui encontrados podem ser aplicados para indústrias do mesmo segmento. No que se refere às variáveis do conforto térmico, sabe-se que existe a probabilidade de imprecisões em outras variáveis com caráter subjetivo, como o isolamento térmico da vestimenta. Dessa forma, pode ser que haja melhorias no modelo do PMV se não se utilizarem as tabelas da ISO 9920 (2007) para a determinação dos coeficientes de isolamento térmico da vestimenta.

Conclui-se que esta pesquisa cumpre seus objetivos, na medida em que se verificam melhorias no modelo do PMV através da determinação de novos valores para a taxa metabólica.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através desta pesquisa foi possível identificar oportunidades que podem ser desenvolvidas em outros trabalhos de cunho científico, tais como:

- Verificação da compatibilidade dos valores da taxa metabólica para outras atividades da ISO 8996 (2004), além do soldador;
- Verificação da imprecisão de outras variáveis do conforto térmico, como o isolamento térmico da vestimenta.

- Determinação de valores calculados de taxa metabólica utilizando-se de outros métodos matemáticos.

REFERÊNCIAS

- ALAHMER, A.; MAYYAS, A.; MAYYAS, Abed A.; OMAR, M.A.; SHAN, D. Vehicular thermal comfort models: a comprehensive review. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, n. 6-7, p. 995-1002, mai. 2011.
- ALFANO, F. R. d'A.; PALELLA, B. I.; RICCIO, G. The role of measurement accuracy on the thermal environment assessment by means of PMV. **Building and Environment**, v. 46, n. 7, p. 1361-1369, jul. 2011.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS, INC. **Thermal environmental conditions for human occupancy**. ASHRAE STANDARD 55-1992. Atlanta, 2004.
- AMPOFO, F.; MAIDMENT, G.; MISSENDEN, J. Underground railway environment in the UK Part 1: Review of thermal comfort. **Applied Thermal Engineering**, v. 24, n. 5-6, p. 611-631, abr. 2004.
- ANDREASI, Wagner A. **Método de avaliação de conforto térmico em região de clima quente e úmido do Brasil**. 2009. 204 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- ANTONELLI, B. A. **Verificação da adequabilidade do modelo normalizado de conforto térmico utilizando a taxa metabólica determinada pelas sensações térmicas reais de usuários em ambientes industriais**. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2012.
- ARAÚJO, V.M.D. **Parâmetros de conforto térmico para usuários de edificações escolares no litoral nordestino brasileiro**. 189 fls. Tese (Doutorado em Engenharia civil) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, 1996.
- BARROS, N.; FEIJÓO, S.; HANSEN, L. D. Calorimetric determination of metabolic heat, CO₂ rates and the calorimetric ratio of soil basal metabolism. **Geoderma**, v. 160, n. 3-4, p. 542-547, jan. 2011.
- BECKER, S.; POTCHTER, O.; YAAKOV, Y. Calculated and observed human thermal sensation in an extremely hot and dry climate. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 8, p. 747-756, set. 2003.

BRUNETTO, Bruna Camargo; GUEDES, Dartagnan Pinto e BRUNETTO, Antonio Fernando. **Taxa metabólica basal em universitários: comparação entre valores medidos e preditos.** *Ver. Nutr.* [online]. 2010, vol.23, n.3, 80d. 369-377. ISSN 1415-5273.

CÂNDIDO, Christhina M. **Aceitabilidade do Movimento do ar e conforto térmico em climas quentes e úmidos.** 2010. 180 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

CÂNDIDO, Christhina; LAMBERTS, Roberto; BITTENCOURT, Leonardo e DEAR, Richard de. **Aplicabilidade dos limites da velocidade do ar para efeito de conforto térmico em climas quentes e úmidos.** *Ambient. Constr. (Online)* [online]. 2010, vol.10, n.4, pp. 59-68. ISSN 1678-8621.

CASTILLA, M.; ALVAREZ, J.D.; BERENGUEL, M.; RODRÍGUEZ, F.; GUZMÁN, J.L.; PÉREZ, M. A comparison of thermal comfort predictive control strategies. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 10, p. 2737-2746, out. 2011.

CHEN, L.; NG, E. Outdoor thermal comfort and outdoor activities: a review of research in the past decade. **Cities**, v. 29, n. 2, p. 118-125, abr. 2012.

CHOI, J-H.; LOFTNESS, V.; LEE, D-W. Investigation of the possibility of the use of heart rate as a human factor for thermal sensation models. **Building and Environment**, v. 50, n. 11, p. 165-175, abr. 2012.

COUTINHO, Antonio Souto. **Conforto e Insalubridade Térmica em Ambientes de Trabalho.** 2.ed. João Pessoa: Universitária, 2005.

ÇENGEL, Y. A. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática.** 3.ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2009.

ÇINAR, N.D.; FILIZ, T.M. Neonatal Thermoregulation. **Journal of Neonatal Nursing**, v.12, n.2, p. 69-74, abr. 2006.

DE DEAR, R. J., BRAGER, G. S. "Developing an adaptive model of thermal comfort and preference" **ASHRAE Transactions**. Atlanta: v. 104, p. 145-167, 1998.

DIAS, Adriana. **Avaliação das condições de conforto térmico e acústico de salas de aula em escola de tempo integral: estudo de caso da escola Padre Josimo em Palmas (TO)**. 2009. 141 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília. Brasília, 2009.

DJONGYANG, N.; TCHINDA, R.; NJOMO, D. Thermal comfort: a review paper. **Renewable and Sustainable Energy**, v. 14, n. 9, p. 2626-2640, dez. 2010.

FANGER, Ole P. **Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1970.

FELIX, Victor Barbosa; MOURA, Danilo de; PEREIRA, Marcelo Luiz e TRIBESS, Arlindo. **Avaliação de conforto térmico em ambientes cirúrgicos utilizando método de Fanger e temperaturas equivalentes**. *Ambient. Constr. (Online)* [online]. 2010, vol.10, n.4, pp. 69-78. ISSN 1678-8621.

FRONTCZAK, M.; WARGOCKI, P. Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments. **Building and Environment**, v. 46, n. 4, p. 922-937, abr. 2011.

GOLDSTEIN,R.J.; IBELE,W.E.; PATANKAR,S.V.; SIMON,T.W.; KUEHN, T.H.; STRYKOWSKI,P.J.; TAMMA, K.K.; HEBERLEIN, J.V.R.; DAVIDSON, J.H.; BISCHOF, J.; KULACKI, F.A.; KORTSHAGEN U.; GARRICK, S.; SRINIVASAN, V.; GHOSH, K.; MITTAL, R. Heat transfer – a review of 2005 literature. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 53, n. 21-22, p. 4397-4447, out. 2010.

GOLDSTEIN,R.J.; IBELE,W.E.; PATANKAR,S.V.; SIMON,T.W.; KUEHN, T.H.; STRYKOWSKI,P.J.; TAMMA, K.K.; HEBERLEIN, J.V.R.; DAVIDSON, J.H.; BISCHOF, J.; KULACKI. Heat transfer – a review of 2004 literature. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 53, n. 21-22, p. 4343-4396, out. 2010.

GREEN, J. A. The heart rate method for estimating metabolic rate: review and recommendations. **Comparative Biochemistry and Physiology – Part A: Molecular & Integrative Physiology**, v. 158, n. 3, p. 287-304, mar. 2011.

GRIEFAHN, B.; KUKNEMUND, C.; GEHRING, U. The impact of draught related to air velocity, air temperature and workload. **Applied Ergonomics**, v. 32, n. 4, p. 407-417, ago. 2001.

GUYTON, A.C. **Tratado de Fisiologia Médica**. 8.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1992.

HAVENITH, G.; HOLMÉR, I.; PARSONS, K. Personal factors in thermal comfort assessment: clothing properties and metabolic heat production. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 581-591, jul. 2002.

HENS, H.S.L.C. Thermal Comfort in office buildings: two case studies commented. **Building and Environment**, v. 44, n. 7, p. 1399-1408, jul. 2009.

HUANG, J.; XU, W. A new practical for the assessment of the heat exchange of human body with the environment. **Journal of Thermal Biology**, v. 31, n. 4, p. 318-322, mai. 2006.

HUMPHREYS, M.A.; NICOL, J. F. Conflicting criteria for thermal sensation within the Fanger predicted mean Vote Equation. In: CIBSE/ASHRAE JOINT NATIONAL CONFERENCE. **Proceeding**, p. 153-158, 1996.

HUMPHREYS, M.A.; NICOL, J.F. The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 667-684, jul. 2002.

INCROPERA, F.; DE WITT, D. **Fundamentos de Transferência de calor e de Massa**. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

INDRAGANTI, M.; RAO, K.D. Effect of age, gender, economic group and tenure on thermal comfort: a Field study in residential buildings in hot and dry climate with seasonal variations. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 3, p. 273-281, mar. 2010.

INANOV, K.P. The development of the concepts of homeothermy and thermoregulation. **Journal of Thermal Biology**, v. 31, n. 1-2, p. 24-29, jan. 2006.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Determination of metabolic heat production**. ISO 8996, Genebra, 2004.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria**. ISO 7730, Genebra, 2005.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Ergonomics of the thermal environment – Instruments for measuring physical quantities.** ISO 7726, Genebra, 1998.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Ergonomics of the thermal environment – Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble.** ISO 9920, Genebra, 2007.

JANG, M.S.; KOH, C.D.; MOON, I.S. Review of thermal comfort design based on PMV/PPD in cabins of Korean maritime patrol vessels. **Building and Environment**, v. 42, n. 1, p. 55-61, jan. 2007.

KATAVOUTAS, G; THEOHARATOS, G; FLOCAS, H.A et al. Measuring the effects of heat wave episodes on the human body's thermal balance. **Int J Biometeorol.** V. 53, p.177–187, 2009.

KILIC, M.; KAYNAKLI, R.; YAMANKAREDENIZ, R. Determination of required core temperature for thermal comfort with steady-state energy balance method. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 33, n. 2, p. 199-210, fev. 2006.

KROEMER, K. H. E.; GRANDJEAN, E. **Manual de Ergonomia: adaptando o trabalho ao homem.** 5.ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

LAKATOS, E.M.; MARCONI, M.A. **Fundamentos de Metodologia Científica.** 6.ed. São Paulo: Atlas, 2001.

LEITE, Brenda C.C. **Sistema de ar condicionado com insuflamento pelo piso em ambientes de escritório: avaliação do conforto térmico e condições de operação.** 2003. 162 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

LOVE, James A.; TIAN, Zhen. A field study of occupant thermal comfort and thermal environments with radiant slab cooling. **Building and Environment**, v. 43, n. 10, p. 1658-1670, out. 2008.

MALCHAIRE, J. Travail à la chaleur. **EMC – Toxicologie-Pathologie**, v. 1, n. 3, p. 96-116, jul. 2004.

MICHALOSKI, Ariel Orlei. **Avaliação do desempenho térmico por meio de simulação computacional de habitações populares implantadas na vila tecnológica de Curitiba**. 2002. 204 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2002.

MONTEIRO, Leonardo M. **Modelos preditivos de conforto térmico: quantificação de relações entre variáveis microclimáticas e de sensação térmica para avaliação e projeto de espaços abertos**. 2008. 378 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

OLIVEIRA, Reginaldo. **Otimização dos pesos das observações geodésicas pelo problema do valor próprio inverso com considerações sobre o planejamento da confiabilidade da observação**. 2007. 251 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Programa de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

PREK, M. Thermodynamic analysis of human heat and mass transfer and their impact on thermal comfort. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. v. 48, p.731-739, 2005.

PARSONS, K.C. Environmental ergonomics: a review of principles, methods and models. **Applied Ergonomics**, v. 31, n. 6, p. 581-594, dez. 2000.

PINTO, N. M. **Condições e parâmetros para a determinação de conforto térmico em ambientes industriais do ramo metal mecânico**. 107 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2011.

SILVA, E. L.; MENEZES, E.M. **Metodologia da pesquisa e Elaboração da Dissertação**. 3. 84d. Ver. Atual. Florianópolis: Laboratório de Ensino a Distância da UFSC, 2001.

SUZUKI, E. H. **Avaliação do Conforto Térmico e do nível de CO2 em edifícios de escritório com climatização artificial na cidade de São Paulo**. 2010. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

SWOKOWSKI, Earl. **Cálculo com Geometria Analítica**. 2.ed. New York: Makron Books, 1994.

TIAN, L.; LIN, Z.; YAO, T. WANG, Q. The impact of temperature on mean local air age and thermal comfort in a stratum ventilated office. **Building and Environment**, v. 46, n. 2, p. 501-210, fev. 2011.

VERGARA, L. G. L. **Análise das condições de conforto térmico de trabalhadores da unidade de terapia intensiva do hospital universitário de Florianópolis**. 201 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

WEI, S.; LI, M.; LIN, W.; SUN, Y. Parametric studies and evaluations of indoor thermal environment in wet season using a field survey and PMV-PPD method. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 6, p. 799-806, jun. 2010.

XAVIER, Antonio A. de P. **Predição de Conforto Térmico em ambientes internos com atividades sedentárias – teoria física aliada a estudos de campo**. 2000. 251 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

YAO, R.; LI, B.; LIU, J. A theoretical adaptive model of thermal comfort – Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV). **Building and Environment**, v. 44, n. 10, p. 2089-2096, out. 2009.

ZOLFAGHARI, A.; MAEREFAT, M. A new simplified thermoregulatory bioheat model for evaluating thermal response of the human body to transient environments. **Building and Environment**, v. 45, n. 10, p. 2068-2076, out. 2010.

ANEXO A – QUESTIONÁRIO DE PESQUISA

AVALIAÇÃO DE CONFORTO TÉRMICO

Quesito 1)

Idade:..... Altura:..... Peso:..... Sexo:..... Data:.....

Quesito 2) **Marque as vestimentas que está utilizando:** (Tabela conforme ISO 9920/95)

Roupas de baixo e Acessórios		Blusa leve fina, manga curta	
Sapato com sola fina		Camiseta	
Sapato com sola grossa		Calças	
Botinas		Calça curta (bermuda)	
Meia soquete fina		Calça tecido fino	
Meia soquete grossa		Calça jeans	
Meia até o joelho		Calça grossa, de lã ou flanela	
Meia de nylon longa fina		Vestidos e Saias	
Meia calça com pernas longas		Saia leve, de verão	
Meia calça com pernas curtas		Saia pesada, de inverno	
Cueca		Vestido de verão, mangas curtas	
Calcinha		Vestido de inverno, manga longa	
Soutien		Vestido completo, fechado	
Camiseta de baixo		Casacos e Suéteres	
Camiseta de baixo manga longa		Colete sem mangas fino	
Gravata		Colete sem mangas grosso	
Camisas e Blusas		Suéter manga longa fino	
Camisa de manga curta		Suéter manga longa grosso	
Camisa manga longa tecido fino		Jaqueta leve	
Camisa manga longa normal		Jaqueta/japona, normal	
Camisa de flanela ou moleton		Paletó	
Blusa leve fina, manga longa		Paletó de verão, blazer	

Houve alguma mudança de vestimentas entre um horário e outro? Qual?

Quesito 3) *“Com relação a sua sensação térmica, como você está se sentindo nesse momento?”*

Com muito calor	<input type="checkbox"/>
Com calor	<input type="checkbox"/>
Levemente com calor	<input type="checkbox"/>
Neutro	<input type="checkbox"/>
Levemente com frio	<input type="checkbox"/>
Com frio	<input type="checkbox"/>
Com muito frio	<input type="checkbox"/>

Quesito 4) *“De que maneira você se encontra nesse momento?”*

Confortável	<input type="checkbox"/>
Levemente inconfortável	<input type="checkbox"/>
Inconfortável	<input type="checkbox"/>
Muito inconfortável	<input type="checkbox"/>

Quesito 5) *“Como você preferia estar se sentindo agora?”*

Bem mais aquecido	<input type="checkbox"/>
Mais aquecido	<input type="checkbox"/>
Um pouco mais aquecido	<input type="checkbox"/>
Assim mesmo	<input type="checkbox"/>
Um pouco mais refrescado	<input type="checkbox"/>
Mais refrescado	<input type="checkbox"/>
Bem mais refrescado	<input type="checkbox"/>

**APÊNDICE A – DADOS AMBIENTAIS PARA OBTENÇÃO DA TAXA
METABÓLICA CALCULADA ($M_{\text{CALCULADO}}$)**

Medição	Temperatura do Ar (°C)	Velocidade do Ar (m/s)	Temperatura de Globo (°C)	Umidade Relativa (%)
1	21,11	0,14	21,26	89,56
2	23,63	0,08	23,69	76,96
3	22,69	0,08	22,74	74,89
4	22,22	0,09	22,52	74,58
5	22,85	0,03	24	50,16
6	25,84	0,21	26,83	64,15
7	23,42	0,05	21,7	49,2
8	23,61	0,10	23,57	68,40
9	19,72	0,02	19,4	43,09
10	26,21	0,05	26,09	64,01
11	20,08	0,01	19,7	89,92
12	21,72	0,02	21,7	88,21
13	21,32	0,03	21	97,38
14	21,45	0,08	21,5	93,65
15	23,81	0,27	24,8	75,63
16	21,13	0,2	20,8	88,66
17	24,49	0,05	26	52,46
18	23,42	0,05	21,7	49,2
19	19,7	0,01	19,7	62,93
20	19,80	0,17	20,15	86,06
21	21,59	0,23	21,80	62,10
22	23,21	0,20	23,38	59,02
23	22,29	0,20	22,59	59,93
24	24,55	0,16	24,57	53,52
25	25,43	0,21	25,77	49,54
26	24,10	0,10	24,80	71,23
27	21,92	0,02	22,10	83,30
28	21,92	0,02	22,29	84,90
29	20,71	0,04	21,02	91,82
30	21,14	0,04	21,32	90,91
31	21,39	0,04	21,57	90,68
MÉDIA	22,47	0,10	22,58	72,13
DESVIO	4,19	0,19	4,19	20,05

**APÊNDICE B – DADOS PESSOAIS PARA OBTENÇÃO DA TAXA METABÓLICA
CALCULADA ($M_{\text{CALCULADO}}$)**

Medição	I_{cl} (clo)	Sensação Térmica
1	0,71	-1
2	0,71	1
3	0,54	0
4	0,49	0
5	0,59	1
6	0,71	2
7	0,61	1
8	0,74	1
9	0,65	1
10	0,74	2
11	0,55	0
12	0,56	1
13	0,61	1
14	0,63	1
15	0,6	1,5
16	0,56	0,5
17	0,56	2
18	0,61	1
19	0,57	0
20	0,51	0
21	0,51	1
22	0,51	1
23	0,51	1
24	0,51	2
25	0,51	2
26	0,58	2
27	0,53	1
28	0,53	1,5
29	0,61	2
30	0,61	2
31	0,61	2
MÉDIA	0,59	1,05

APÊNDICE C – DADOS AMBIENTAIS PARA OBTENÇÃO DO PMV

Medição	Temp_Ar	Velocidade	T_Globo	UR	Icl	Sensação
1	22,29	0,06	22,84	91,41	0,61	1
2	22,44	0,05	22,89	91,58	0,63	2
3	22,58	0,04	22,94	91,09	0,6	1
4	22,72	0,04	22,97	91,05	0,56	1
5	22,88	0,04	23,03	91,29	0,56	1
6	23,01	0,04	23,12	91,69	0,61	2
7	23,14	0,04	23,23	91,45	0,57	2
8	23,05	0,05	23,16	90,24	0,51	2
9	22,79	0,10	23,31	89,52	0,51	1
10	23,03	0,12	23,41	87,46	0,51	1
11	23,67	0,13	23,96	75,86	0,51	1
12	23,26	0,10	23,68	86,99	0,51	0
13	22,92	0,18	23,67	87,70	0,51	1
14	23,24	0,07	23,69	87,64	0,59	1
15	23,36	0,07	23,76	87,90	0,71	1
16	23,39	0,11	23,83	86,64	0,61	1,5
17	23,60	0,11	23,87	86,41	0,74	2
18	24,68	0,09	25,29	86,70	0,65	2
19	24,75	0,08	25,33	85,94	0,74	2
20	24,99	0,09	25,40	85,76	0,55	1
21	25,08	0,09	25,51	84,59	0,56	1
22	25,25	0,45	25,32	79,23	0,56	1
23	25,15	0,40	25,36	78,86	0,61	0
24	25,19	0,43	25,34	78,98	0,57	0
25	25,27	0,37	25,34	78,58	0,58	2
26	25,20	0,39	25,32	78,67	0,53	0
27	25,20	0,42	25,32	78,61	0,53	1
28	25,17	0,39	25,32	78,80	0,61	1,5
29	25,20	0,41	25,32	78,77	0,61	2
30	25,33	0,39	25,38	78,02	0,61	2
31	25,27	0,40	25,42	77,70	0,61	2
MÉDIA	23,97	0,19	24,27	85,00	0,59	1,26
DESVIO	1,11	0,16	1,04	5,37	0,06	0,67