

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS -UNICAMP

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

Avaliação de conforto térmico
Contribuição à aplicação prática das normas internacionais

Álvaro Cesar Ruas

Campinas - SP
1999

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS -UNICAMP

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

Avaliação de conforto térmico
Contribuição à aplicação prática das normas internacionais

Álvaro Cesar Ruas

Orientador : Profa. Dra. Lucila Chebel Labaki

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Saneamento

Atesto que esta é a versão definitiva da dissertação/tese. 06/05/99

Prof. Dr. *Labaki*
Matrícula: 148059

Campinas - SP
1999

9913824



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	20/07/99
V.	EX
TOMBO BC	33097
PREC.	229,99
	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>
PRECED.	R\$ 11,00
DATA	20/07/99
N.º OPD	

CM-00125580-9

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

R821a Ruas, Álvaro Cesar
Avaliação de conforto térmico: contribuição à
aplicação prática das normas internacionais. / Álvaro
Cesar Ruas.--Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientadora: Lucila Chebel Labaki
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

1. Conforto térmico - Avaliação. 2. Ergonomia. I.
Labaki, Lucila Chebel. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Civil. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS -UNICAMP

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

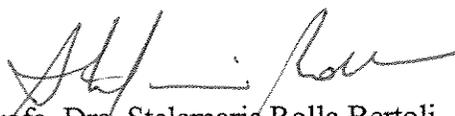
Avaliação de conforto térmico
Contribuição à aplicação prática das normas internacionais

Álvaro Cesar Ruas

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



Prof. Dra. Lucila Chebel Labaki
Presidente e Orientador/UNICAMP



Prof. Dra. Stelamaris Rolla Bertoli
UNICAMP



Prof. Dra. Irenilza de Alencar Nããs
UNICAMP

Campinas, 24 de fevereiro de 1999.

Dedico esse trabalho aos meus pais, Lais e Fernando, e à minha tia Cybelle pelo sacrifício para a minha educação e também à minha esposa Silvia e filhos Lucas e Mateus que são a justificativa para o meu esforço.

Agradecimentos:

A DEUS, por tudo que tem feito por mim.

À FUNDACENTRO, que permitiu e apoiou esse trabalho.

À professora Lucila Chebel Labaki, pela boa orientação e ajuda nos momentos necessários.

Ao engenheiro Paulo Alves Maia, pela prontidão para nos ouvir e para colaborar.

**A sabedoria é uma descoberta progressiva da
nossa ignorância que está mais próxima dos
humildes.**

Álvaro Cesar Ruas

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS	IX
RESUMO	XI
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 INTERAÇÃO TÉRMICA DO HOMEM E O MEIO AMBIENTE	7
1.1.1 TERMORREGULAÇÃO HUMANA	7
1.1.2 BALANÇO TÉRMICO DO CORPO HUMANO	9
1.1.2.1 PERDAS DE CALOR SENSÍVEL DA PELE	11
1.1.2.2 PERDAS DE CALOR LATENTE DA PELE	14
1.1.2.3 PERDA TOTAL DE CALOR ATRAVÉS DA PELE	15
1.1.2.4 PERDAS DE CALOR PELA RESPIRAÇÃO	15
2 OBJETIVOS	18
3 REVISÃO DE LITERATURA	19
4 ANÁLISE TEÓRICA	46
4.1 AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO PELA ISO 7730(1994)	47

4.2 APLICAÇÃO PRÁTICA DA ISO 7730(1994)	51
4.3 INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS PESSOAIS NO CONFORTO TÉRMICO	52
4.4 ESTABELECIMENTO DA TAXA DE METABOLISMO	53
4.5 ESTIMATIVA DO ISOLAMENTO TÉRMICO DAS VESTIMENTAS	60
5 CONCLUSÕES	67
6 SUGESTÃO DE NOVOS TRABALHOS	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
ABSTRACT	78

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{cl}	Área da vestimenta, $\{m^2\}$
A_{Du}	Área superficial do corpo (DuBois), $\{m^2\}$
C	Calor trocado por convecção, $\{W/m^2\}$
c_a	Calor específico do ar, $\{kJ/(kg.K)\}$
CET	Temperatura efetiva corrigida, $\{^{\circ}C\}$
C_{res}	Taxa de perda de calor convectivo na respiração, $\{W/m^2\}$
E_{dif}	Taxa de calor perdido por evaporação da água de difusão, $\{W/m^2\}$
E_{res}	Taxa de perda de calor evaporativo na respiração, $\{W/m^2\}$
E_{rsw}	Taxa de calor perdido por evaporação da transpiração, $\{W/m^2\}$
E_{sk}	Perda total de calor por evaporação, $\{W/m^2\}$
E_{sw}	Calor perdido pela evaporação do suor, $\{kcal/h\}$
ET	Temperatura efetiva, $\{^{\circ}C\}$
ET*	Nova temperatura efetiva, $\{^{\circ}C\}$
f_{cl}	Fator de área da vestimenta;
H	Calor produzido pelo metabolismo, $\{kcal/h\}$;
h	Coefficiente combinado de troca de calor por convecção e radiação, $\{W/(m^2.K)\}$
h_c	Coefficiente de troca de calor por convecção, $\{W/(m^2.K)\}$
h_e	Coefficiente de troca de calor por evaporação, $\{W/(m^2.kPa)\}$
h_{fg}	Calor latente de vaporização da água, $\{kJ/kg\}$
h_r	Coefficiente de troca de calor por radiação, $\{W/(m^2.K)\}$
I_a	Resistência da camada superficial de ar, $\{(m^2.^{\circ}C)/W\}$
I_{cl}	Isolamento térmico básico da vestimenta, $\{(m^2.^{\circ}C)/W\}$
I_{cle}	Isolamento térmico efetivo, $\{(m^2.^{\circ}C)/W\}$;
I_t	Isolamento térmico total da vestimenta, $\{(m^2.^{\circ}C)/W\}$
i_{cl}	Eficiência de permeabilidade ao vapor d'água só da camada de vestimenta
i_m	Índice de permeabilidade ao vapor d'água;
K_{res}	Constante de proporcionalidade (vazão mássica pulmonar) = 2,58 kg.m ² /MJ;
L	Relação de Lewis, $L = 16,5 \text{ }^{\circ}C/kPa$
l	Altura do corpo, $\{m\}$
M	Taxa de metabolismo, $\{W/m^2\}$
m	Massa do corpo, $\{kg\}$
m_{res}	Vazão mássica de ar pulmonar, $\{kg/s\}$

p_a	Pressão de vapor d'água no ambiente, {kPa}
PMV	Predicted Mean Vote (Voto Médio Estimado = VME).
PPD	Porcentagem Estimada de Insatisfeitos
$p_{sk,s}$	Pressão de vapor d' água na pele, {kPa}
Q_{res}	Taxa total de calor perdido pela respiração, {W/m ² }
Q_{sk}	Taxa total de calor perdido pela pele, {W/m ² }
R	Calor trocado por radiação, {W/m ² }
$R_{e,a}$	Resistência da camada de ar superficial à troca por evaporação, {(m ² .kPa)/W}
$R_{e,cl}$	Resistência da vestimenta à troca por evaporação, {(m ² .kPa)/W}
RQ	Quociente respiratório, razão entre o volume de CO ₂ produzido e o volume de O ₂ consumido
R_t	Resistência total à evaporação da pele até o ambiente, isto é incluindo a resistência da camada superficial de ar, {(m ² .kPa)/W}
S	Taxa de calor armazenada no corpo, (W/m ²)
SET	Temperatura efetiva padrão, {°C}
t_a	Temperatura do ar ambiente, {°C}
t_{bs}	Temperatura de bulbo seco, {°C}
t_{cl}	Temperatura superficial média da vestimenta, {°C}
t_{ex}	Temperatura do ar expirado, {°C}
t_{mrt}	Temperatura radiante média, {°C}
t_o	Temperatura operante, {°C}
t_s	Temperatura superficial média da pele, {°C}
UR	Umidade relativa, {%
v_a	Velocidade do ar, {m/s}
v_{ar}	Velocidade relativa do ar, {m/s}
VME	Voto Médio Estimado
V_{O_2}	Oxigênio consumido em CNTP, {l _{O₂} /h}
W	Taxa de trabalho mecânico realizado, {W/m ² }
w	Fração de pele úmida
W_a	Conteúdo de umidade do ar ambiente, {kg vapor d'água/kg ar seco}
W_{ex}	Conteúdo de umidade do ar expirado, {kg vapor d'água/kg ar seco}
η	Rendimento do trabalho mecânico externo;

RESUMO

Ruas, Álvaro Cesar. Avaliação de conforto térmico - Contribuição à aplicação prática das normas internacionais. Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 1999. 71 p. Dissertação.

No Brasil, país com clima predominantemente quente e úmido, o restrito material bibliográfico sobre o tema avaliação de conforto térmico, contrapõe-se ao anseio mundial por informações que permitam a construção de edificações confortáveis e energeticamente econômicas.

Dessa forma esse trabalho explica o método para avaliar o conforto térmico estabelecido na norma ISO 7730 (1994) e efetua um relato sucinto sobre as normas por ela referenciadas. Analisa-se também, teoricamente, a aplicação prática dessas normas, discutindo os erros provenientes das estimativas da taxa de metabolismo e do isolamento térmico das vestimentas e a sua influência na avaliação do conforto térmico.

O trabalho conclui que, tendo em vista a grande influência da taxa de metabolismo e do isolamento térmico das vestimentas no conforto térmico, o uso de tabelas para a sua estimativa pode sujeitar o processo a erros consideráveis, resultando numa previsão irreal da sensação térmica. Esses erros devem-se ao fato de que a escolha de valores tabelados dificulta a consideração de diferenças individuais, de equipamentos utilizados, de técnica e ritmo de trabalho. Além do mais, a subjetividade inerente ao processo faz com que as diferenças entre os observadores, relativas principalmente ao nível de treinamento, influenciem nas avaliações.

Palavras Chave: Conforto térmico, Avaliação, ISO 7730, Ergonomia

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma grande extensão territorial e, por isso, apresenta diferentes regimes de chuvas e de temperaturas. De norte a sul encontra-se uma grande variedade de climas com distintas características regionais. No Norte do país verifica-se um clima equatorial chuvoso, praticamente sem estação seca. O Nordeste caracteriza-se por um clima semi-árido onde a estação chuvosa, com baixos índices pluviométricos, restringe-se a poucos meses. As regiões Sudeste e Centro-Oeste sofrem a influência tanto de sistemas de latitudes médias como dos tropicais, com estação seca bem definida no inverno e estação chuvosa no verão. O sul do Brasil sofre mais influência dos sistemas de latitudes médias e as chuvas durante o ano são principalmente causadas pelos sistemas frontais.

Com relação às temperaturas, observa-se nas regiões norte e nordeste um clima quente com temperaturas elevadas e com pouca variabilidade durante o ano. O Sudeste e o Centro-Oeste, devido às suas localizações latitudinais caracterizam-se por serem regiões de transição entre os climas quentes de latitudes baixas e os mesotérmicos de tipo temperado das latitudes médias. O Sul do país é a região com maior variabilidade térmica anual embora a distribuição regional das temperaturas seja bastante uniforme. No inverno é frequente a penetração de massas de ar frio de altas latitudes, o que contribui para a predominância de baixas temperaturas.

Para uma análise simplificada da exposição da população brasileira ao clima pode-se utilizar a temperatura anual média. Assim, com os dados populacionais de 1996 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE e as informações colhidas no período de 1931 a 1990 pelo Instituto Nacional de Meteorologia - INMET pode-se relacionar os intervalos de temperatura

anual média registrados no país e as respectivas parcelas da população brasileira a eles expostas.

A tabela 1.1 mostra essa relação :

Tabela 1.1 Relação entre a temperatura anual média e a parcela aproximada da população brasileira exposta.

Temperatura Anual Média (°C)	Parcela aproximada da população (%)	Parcela aproximada da população (n° de pessoas)
24,1 a 27	38	59.690.238
21,1 a 24	34,5	54.192.453
18,1 a 21	20	31.415.915
15,1 a 18	7,5	11.780.968

Embora a temperatura anual média não seja suficiente para expressar a real exposição da população brasileira ao clima, os valores mostrados na tabela 1 e o intervalo de 23 °C a 25 °C recomendado para o conforto de pessoas em atividades sedentárias pela norma NBR 6401 (1980) são um bom indicativo da necessidade de se estudar o conforto térmico no Brasil, para melhor adequar o projeto das edificações à satisfação do usuário e à conservação de energia.

De acordo com o IBGE, censo demográfico de 1991, cerca de 75 % da população brasileira é urbana. Sabendo-se que as populações urbanas passam quase que a totalidade do seu tempo em ambientes edificados, especial atenção deve ser dada ao estudo das condições ambientais satisfatórias à ocupação humana e às características construtivas das edificações necessárias à obtenção dessas condições. Entre essas condições satisfatórias à ocupação humana situa-se a de conforto térmico.

O conforto térmico está estritamente relacionado ao equilíbrio térmico do corpo humano.

O homem é um ser homotérmico, isto é, mantém, dentro de certos limites, a temperatura corporal interna relativamente constante independente da temperatura ambiente.

Ocorre que o homem produz, através do processo metabólico, energia interna que é obtida a partir da transformação dos alimentos. Essa energia é consumida na manutenção das

funções fisiológicas vitais, na realização de trabalhos mecânicos externos (atividade muscular), e o restante é liberado na forma de calor. A produção de calor é contínua e aumenta com o esforço físico executado, portanto deverá haver uma permanente e imediata eliminação do excesso de calor produzido para que a temperatura do corpo possa ser mantida constante.

O equilíbrio térmico do corpo humano é mantido por um sistema orgânico chamado de termorregulador, que através de ações fisiológicas interfere nas trocas térmicas com o ambiente.

Conforto e equilíbrio térmico do corpo humano estão relacionados, na medida em que a sensação de bem estar térmico depende do grau de atuação do sistema termorregulador para a manutenção do equilíbrio térmico. Isso significa que, quanto maior for o trabalho desse sistema para manter a temperatura interna do corpo, maior será a sensação de desconforto.

Portanto o conforto térmico depende de fatores que interferem no trabalho do sistema termorregulador como: taxa de metabolismo, isolamento térmico da vestimenta, temperatura radiante média, umidade relativa, temperatura e velocidade relativa do ar.

O efeito combinado de todos esses fatores é que determina a sensação de conforto ou desconforto térmico embora, por motivo de classificação, os dois primeiros fatores sejam chamados de variáveis pessoais e os quatro últimos de variáveis ambientais.

Dessa forma, a primeira condição para se obter conforto térmico é que o corpo esteja em equilíbrio térmico, ou seja, a quantidade de calor ganho (metabolismo + calor recebido do ambiente) deve ser igual à quantidade de calor cedido para o ambiente. Essa condição é necessária mas não suficiente para que haja conforto térmico. Isso pode ser explicado pela eficiência do sistema termorregulador, que consegue manter o equilíbrio térmico do organismo numa ampla faixa de combinações das variáveis pessoais e ambientais, embora o conforto térmico só ocorra numa restrita faixa dessas combinações.

Assim o conforto térmico num determinado ambiente pode ser definido como a sensação de bem estar experimentada por uma pessoa, como resultado de uma combinação satisfatória, nesse ambiente, da temperatura radiante média, umidade relativa, temperatura e velocidade relativa do ar com a atividade desenvolvida e a vestimenta utilizada.

O conforto térmico é uma sensação e, portanto, subjetiva, isto é, depende das pessoas. Assim, um ambiente confortável termicamente para uma pessoa pode ser desconfortável para outra. Logo, quando tratamos das condições ambientais para o conforto térmico de um grupo de pessoas, entendemos as condições que propiciam bem estar ao maior número possível de pessoas, mas não necessariamente para todas.

As variáveis ambientais numa edificação dependem das suas características construtivas; assim o clima deve ser decisivo na definição dessas características para que o desconforto imposto por condições climáticas adversas seja amenizado e dessa forma o consumo de energia para ventilação, refrigeração e/ou aquecimento seja o mínimo possível. Contudo as condições satisfatórias de conforto térmico de uma edificação não dependem só da sua adequação ao clima mas também da sua adaptação às atividades lá desenvolvidas e aos equipamentos envolvidos.

É fato que, em muitos casos, as edificações são projetadas principalmente em função de tendências estéticas ou exigências técnicas de produção, sem a preocupação com o conforto térmico das pessoas nem com a conservação de energia.

Ambientes tradicionalmente problemáticos sob o aspecto de exposição dos trabalhadores ao calor poderiam ser melhores se a sua concepção tivesse como ideal o conforto térmico dos trabalhadores ao invés de se restringir a evitar o estresse térmico daqueles que estão expostos às condições mais extremas.

Essa visão moderna, e principalmente humana de analisar os ambientes laborais possibilita a identificação e análise de problemas e necessidades que hoje são ignorados, mas que

certamente influenciam na eficiência e produtividade do trabalhador, por afetarem a sua segurança e motivação.

Nesse contexto, a avaliação do conforto térmico é uma ferramenta importante a ser usada em conjunto com programas simuladores de desempenho térmico para melhor adequar o projeto dos prédios ao clima e aos trabalhos executados, bem como para, na fase pós ocupação, identificar e equacionar problemas oriundos do projeto, da construção ou da manutenção da edificação e também aqueles relativos à organização do trabalho.

A necessidade de se conhecer a sensação térmica experimentada pelas pessoas quando expostas a determinadas combinações das variáveis ambientais e pessoais levou ao desenvolvimento de índices de conforto.

Índice de conforto é um parâmetro que representa o efeito combinado das principais variáveis intervenientes. Através dele é possível avaliar a situação de conforto térmico de um ambiente, bem como obter subsídios para melhor adequá-lo às necessidades humanas.

Os primeiros esforços organizados para o estabelecimento de índices de conforto térmico foram realizados nos Estados Unidos da América no período de 1913 a 1923. Desde então e até hoje esse assunto vem sendo estudado em diferentes partes do mundo e vários métodos para avaliação de conforto térmico tem sido propostos.

O método mais conhecido e amplamente aceito é o Predicted Mean Vote (PMV) ou Voto Médio Estimado (VME), que foi desenvolvido pelo professor dinamarquês Ole Fanger e publicado em FANGER(1970).

Fanger usou dados obtidos em experiências de laboratório, com mais de 1300 pessoas, para estabelecer uma equação que permite, a partir do conhecimento das variáveis ambientais e pessoais, estimar a sensação térmica média de um grupo de pessoas (VME) quando exposto a

uma determinada combinação dessas variáveis. O VME é dado na seguinte escala de sensações térmicas :

- + 3 - muito calor
- +2 - calor
- +1 - leve calor
- 0 - conforto
- 1 - leve frio
- 2 - frio
- 3 - muito frio

A fim de conhecer a quantidade de pessoas termicamente descontentes com um ambiente, Fanger relacionou o valor do VME com a porcentagem estimada de insatisfeitos (PEI).

O método de Fanger foi adotado como base para o desenvolvimento de uma norma que especifica condições de conforto térmico para ambientes termicamente moderados (ISO 7730, 1984) e da sua atualização em 1994.

A aplicação prática dessa norma, porém, deve ser cuidadosa uma vez que o PMV é um modelo matemático desenvolvido a partir de experiências em laboratório onde todas as variáveis foram medidas; essa condição, contudo, não pode ser garantida para as variáveis pessoais nas aplicações de campo devido aos recursos técnicos necessários. Assim essas variáveis tem que ser subjetivamente estimadas e isso pode gerar erros consideráveis na avaliação do conforto térmico.

No Brasil, a literatura nacional sobre conforto térmico está desatualizada e das quatro pesquisas conhecidas sobre métodos para a avaliação de conforto térmico (XAVIER & LAMBERTS, 1997 ; RIBEIRO, 1945 ; SÁ, 1936 e SÁ, 1934), três foram feitas no período de 1930 a 1945. Dessa forma os profissionais de projeto de edificações e de sistemas de ventilação e ar condicionado, bem como aqueles responsáveis pela segurança e higiene do trabalho não dispõem de conhecimento atualizado nem de ferramentas práticas que permitam a avaliação do conforto térmico dos ambientes edificados.

1.1 Interação térmica do homem e o meio ambiente

O corpo humano é um sistema termodinâmico que produz calor e interage continuamente com o ambiente para conseguir o balanço térmico indispensável para a vida. Existe assim uma constante troca de calor entre o corpo e o meio, regida pelas leis da física e influenciada por mecanismos de adaptação fisiológica, por condições ambientais e por fatores individuais.

A sensação de conforto térmico está intimamente relacionada com o esforço realizado pelo organismo para manter o balanço térmico e assim, para maior entendimento desse processo, trata-se a seguir da termorregulação humana e do balanço térmico do corpo humano.

1.1.1 Termorregulação Humana

O principal objetivo da termorregulação é impedir grandes variações na temperatura interna do corpo de maneira que os sistemas vitais possam operar adequadamente. Essa tarefa é coordenada pelo hipotálamo, que é a parte do cérebro responsável por várias funções automáticas como: balanço de água, atividades vasomotoras e humorais. O hipotálamo recebe impulsos, originados em células termossensíveis existentes na pele, nos músculos e em outras partes do organismo, e manda através dos nervos comandos que acionam mecanismos de compensação, como a vasoconstrição e vasodilatação cutâneas e a sudação, que interferem nas trocas térmicas do corpo com o ambiente de forma a manter a temperatura interna.

O processo pode ser assim exemplificado:

Quando se entra num ambiente quente, os sensores na pele verificam o diferencial de temperatura entre o corpo e o ambiente e informam ao hipotálamo, que inicia o processo de

vasodilatação para permitir que uma maior quantidade de sangue percorra os vasos superficiais, aumentando assim a temperatura da pele e propiciando uma maior dissipação de calor por convecção e radiação. Adicionalmente poderia haver um aumento da frequência cardíaca para aumentar a vazão de sangue para a pele. Quando as ações anteriores não são suficientes para manter o equilíbrio térmico é iniciada a produção de suor para que o corpo possa perder calor com a sua evaporação.

De forma recíproca, quando se entra num ambiente frio é iniciada a vasoconstrição, que restringe a passagem do sangue na superfície da pele, privilegiando a circulação no cérebro e em outros órgãos vitais, de maneira a manter a temperatura necessária à realização das funções críticas do organismo. Esse processo também abaixa a temperatura da pele, diminuindo assim a troca de calor com o meio. Quando a vasoconstrição não consegue o equilíbrio térmico o sistema termorregulador provoca o tremor muscular que aumenta o metabolismo nos músculos e portanto a produção de calor interno.

A atividade vasomotriz representa a resposta inicial do corpo a uma situação desfavorável no que se refere ao seu equilíbrio térmico. No caso de ambientes quentes, a sudação é um mecanismo fundamental para intensificar a perda de calor para o ambiente. Nos ambientes frios o tremor muscular é o mecanismo que aumenta a produção de calor interno.

A temperatura do corpo não é igualmente distribuída em todo o organismo. Uma temperatura próxima dos 37 °C é mantida no interior do cérebro, do coração e nos órgãos abdominais, essa é a temperatura de núcleo. MACINTYRE (1980) cita que essa temperatura de núcleo, ajustada pelo sistema termorregulador, não é constante e depende da taxa de metabolismo. O autor afirma que em atividades físicas severas, com alta taxa de metabolismo, essa temperatura pode ser elevada até 39,5 °C e que a febre também eleva a temperatura de núcleo.

Ao contrário da temperatura de núcleo, a temperatura nos membros, nos músculos e especialmente na pele (temperatura periférica) sofre oscilações. As variações nessa última

determinam as modificações na troca de calor por convecção e radiação entre o corpo e o ambiente.

FANGER (1970) afirma que para uma determinada taxa de metabolismo, a temperatura média da pele e a quantidade de calor perdida por evaporação do suor são as únicas variáveis fisiológicas que influenciam no equilíbrio térmico do corpo e, portanto, o conforto tem que estar relacionado com a magnitude delas. Isso representa que, para cada taxa de metabolismo existe uma temperatura média da pele e uma quantidade de calor perdida por evaporação do suor que correspondem à sensação de conforto. Essa hipótese é fundamental no método dos Votos Médios Estimados desenvolvido por FANGER (1970).

1.1.2 Balanço térmico do corpo humano

O equilíbrio térmico é essencial para a vida humana e é obtido quando a quantidade de calor produzida no corpo é igual à quantidade de calor cedida para o ambiente através da pele e da respiração. O calor produzido é a diferença entre a taxa de metabolismo e o trabalho mecânico realizado. A ASHRAE (1997a) propõe a seguinte equação para expressar matematicamente esse processo:

$$M - W = Q_{sk} + Q_{res} + S \quad (1.1)$$

sendo:

$$Q_{sk} = C + R + E_{rsw} + E_{dif} \quad (1.2)$$

$$Q_{res} = C_{res} + E_{res} \quad (1.3)$$

onde:

M	Taxa de metabolismo, W/m ² ;
W	Taxa de trabalho mecânico realizado, W/m ² ;
Q _{sk}	Taxa total de calor perdido pela pele, W/m ² ;
Q _{res}	Taxa total de calor perdido pela respiração, W/m ² ;
S	Taxa de calor armazenada no corpo, W/m ² ;
C + R	Perdas de calor sensível pela pele por convecção e radiação, W/m ² ;
E _{rsw}	Taxa de calor perdido por evaporação da transpiração, W/m ² ;
E _{dif}	Taxa de calor perdido por evaporação da água de difusão, W/m ² ;
C _{res}	Taxa de perda de calor convectivo na respiração, W/m ² ;
E _{res}	Taxa de perda de calor evaporativo na respiração, W/m ² ;

Um valor positivo para o termo S representa o aquecimento do corpo, da mesma forma que um valor negativo mostra o seu resfriamento; quando S é igual a zero, o corpo está em equilíbrio térmico.

O trabalho mecânico realizado pelos músculos (W) é normalmente expresso em termos de eficiência mecânica do corpo $\eta=W/M$. O valor de η é no máximo, em condições ótimas, 24% e para a maioria das atividades está próximo a zero. Por isso o trabalho mecânico é normalmente considerado nulo e a taxa de metabolismo igual ao calor produzido.

Todos os termos da equação de balanço térmico são dados na unidade de energia por área e referem-se a área superficial do corpo nu. Essa área normalmente é calculada pela equação de DuBois (ASHRAE, 1997a):

$$A_{Du} = 0,202 \cdot m^{0,425} \cdot l^{0,725} \quad (1.4)$$

onde:

m massa do corpo, kg;

l altura do corpo, m.

Como a roupa aumenta a área superficial de uma pessoa, deve-se aplicar um fator de correção nos termos de transferência de calor da pele (C, R, E_{rsw} e E_{dif}) para considerar a área

superficial de cada vestimenta. Esse fator, chamado fator de área da vestimenta, é calculado pela seguinte equação:

$$f_{cl} = \frac{A_{cl}}{A_{Du}} \quad (1.5)$$

onde:

f_{cl} Fator de área da vestimenta;
 A_{cl} Área da vestimenta, m²;
 A_{Du} Área DuBois, m².

A expressão matemática do balanço térmico do corpo humano representa uma solução combinada, racional/empírica, para descrever as trocas térmicas com o ambiente. A teoria fundamental de transferência de calor é usada para o cálculo das trocas de calor sensível e latente, enquanto que expressões empíricas são usadas para determinar o valor dos coeficientes de troca de calor. As equações que permitem calcular as perdas de calor do corpo serão estudadas a seguir:

1.1.2.1 Perdas de calor sensível da pele

O calor sensível da pele tem que passar pela roupa até chegar ao ambiente. Neste processo o calor tem que transpor duas etapas distintas e sucessivas : 1º) A transferência de calor da superfície da pele, atravessando a vestimenta, até a superfície externa da mesma; 2º) A transferência de calor da superfície da roupa para o ambiente.

Dessa forma, para a transferência do calor sensível para o ambiente, através da vestimenta, estão envolvidos os processos de condução, convecção e radiação. O cálculo pode ser realizado pela seguinte equação:

$$(C + R) = \frac{t_s - t_{cl}}{I_{cl}} \quad (1.6)$$

onde:

- C Calor trocado por convecção, W/m²;
- R Calor trocado por radiação, W/m²;
- t_s Temperatura superficial da pele, °C;
- t_{cl} Temperatura superficial da vestimenta, °C;
- I_{cl} Isolamento térmico básico da vestimenta, m² .°C/W.

As perdas de calor por convecção (C) e radiação (R) de um corpo vestido podem ser calculadas em função de coeficientes de troca de calor e diferenças de temperatura:

$$C = f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \quad (1.7)$$

$$R = f_{cl} \cdot h_r \cdot (t_{cl} - t_{mrt}) \quad (1.8)$$

onde:

- f_{cl} Fator de área da vestimenta;
- h_c Coeficiente de troca de calor por convecção, W/(m².K);
- h_r Coeficiente de troca de calor por radiação, W/(m².K);
- t_{cl} Temperatura média da vestimenta, °C;
- t_a Temperatura do ambiente, °C;
- t_{mrt} Temperatura radiante média, °C.

As equações 1.7 e 1.8 podem ser combinadas para descrever a troca total de calor sensível por estes dois mecanismos, em termos de uma temperatura operante (t_o) e um coeficiente combinado de transferência de calor por convecção e radiação (h):

$$(C + R) = f_{cl} \cdot h \cdot (t_{cl} - t_o) \quad (1.9)$$

onde:

$$h = h_r + h_c \quad (1.10)$$

$$t_o = \frac{h_r \cdot t_{mrt} + h_c \cdot t_a}{h_r + h_c} \quad (1.11)$$

Dessa forma a temperatura operante (t_o) pode ser matematicamente definida como a média entre a temperatura do ambiente e a temperatura radiante média, ponderada pelos respectivos coeficientes de transmissão de calor.

Havendo inconveniente em incluir a temperatura média da vestimenta (t_{cl}) nos cálculos, pode-se combinar as equações 1.6 e 1.9 para eliminá-la:

$$(C + R) = \frac{t_s - t_o}{I_{cl} + \frac{1}{f_{cl} \cdot h}} \quad (1.12)$$

onde a resistência térmica global da vestimenta é representada por:

$$I_{cl} + \frac{1}{f_{cl} \cdot h}$$

O termo I_{cl} representa a resistência da vestimenta à troca de calor sensível e $1/(f_{cl} \cdot h)$ a resistência da camada de ar que rodeia o corpo. Chamando essa última de I_a , a equação 1.12 pode ser escrita da seguinte forma:

$$(C + R) = \frac{t_s - t_o}{I_{cl} + I_a} \quad (1.13)$$

1.1.2.2 Perdas de calor latente da pele

A perda de calor por evaporação na pele depende da diferença entre a pressão de vapor d'água junto à pele e no ar ambiente, da permeabilidade da vestimenta e da quantidade de umidade na pele. Em termos de equação tem-se:

$$E_{sk} = \frac{w \cdot (p_{sk,s} - p_a)}{R_{e,cl} + \frac{1}{f_{cl} \cdot h_e}} \quad (1.14)$$

onde:

- E_{sk} Perda total de calor por evaporação, W/m^2 ;
- w Fração de pele úmida;
- $p_{sk,s}$ Pressão de vapor d' água na pele, normalmente considerada saturada em t_s , kPa;
- p_a Pressão de vapor d'água no ambiente, kPa;
- $R_{e,cl}$ Resistência da vestimenta à troca por evaporação, $(m^2 \cdot kPa)/W$;
- h_e Coeficiente de troca de calor por evaporação, $W/(m^2 \cdot kPa)$.

A perda total por evaporação na pele é uma combinação da evaporação do suor segregado pelo mecanismo termorregulador (E_{rsw}) e da água provinda da difusão natural através da pele (E_{dif}).

$$E_{sk} = E_{rsw} + E_{dif} \quad (1.15)$$

A máxima perda de calor por evaporação na pele ocorre quando esta fica completamente úmida, ou $w = 1,0$. O menor valor de w é 0,06, por ser a pele uma membrana permeável e ocorrer a difusão de água (ASHRAE, 1997a).

O termo denominador da equação 1.14 representa a resistência total à evaporação que considera os efeitos da vestimenta ($R_{e,cl}$) e da camada de ar que a rodeia ($1/(f_{cl} \cdot h_e)$). Preferindo-se

expressar essa última resistência em função do coeficiente de convecção (h_c), pode-se utilizar a relação de Lewis ($L = h_e/h_c$) que para ambientes internos é aproximadamente igual a $16,5 \text{ }^\circ\text{C/kPa}$ (ASHRAE, 1997a). Dessa forma a equação 1.14 pode ser escrita da seguinte forma:

$$E_{sk} = \frac{w \cdot (p_{sk,s} - p_a)}{R_{e,cl} + \frac{1}{f_{cl} \cdot L \cdot h_c}} \quad (1.16)$$

1.1.2.3 Perda total de calor através da pele

Os itens anteriores trataram as perdas sensíveis e latentes como fenômenos distintos, mas na realidade, como mostrado pela relação de Lewis, eles estão muito relacionados. Assim a perda total de calor sensível e latente pela pele (Q_{sk}) pode ser calculada somando-se as equações 1.13 e 1.16:

$$Q_{sk} = \frac{t_s - t_o}{I_{cl} + I_a} + \frac{w \cdot (p_{sk,s} - p_a)}{R_{e,cl} + \frac{1}{f_{cl} \cdot L \cdot h_c}} \quad (1.17)$$

1.1.2.4 Perdas de calor pela respiração

Durante a respiração o ar é inspirado nas condições ambientes e expirado praticamente saturado e numa temperatura levemente inferior à temperatura interna do corpo. Esse aquecimento e umidificação do ar representam para o organismo a perda de calor sensível e

latente. Essa perda é proporcional à quantidade de ar inalado, que por sua vez depende da atividade física (taxa de metabolismo).

As perdas de calor sensível (C_{res}) e latente (E_{res}) devidas à respiração são:

$$C_{res} = m_{res} \cdot c_a \cdot \frac{t_{ex} - t_a}{A_{Du}} \quad (1.18)$$

$$E_{res} = m_{res} \cdot h_{fg} \cdot \frac{W_{ex} - W_a}{A_{Du}} \quad (1.19)$$

onde:

- m_{res} Vazão mássica de ar pulmonar, kg/s;
- c_a Calor específico do ar, kJ/(kg.K);
- h_{fg} Calor latente de vaporização da água, kJ/kg;
- t_{ex} Temperatura do ar expirado, °C;
- t_a Temperatura do ar ambiente, °C;
- W_{ex} Conteúdo de umidade do ar expirado, kg vapor d'água/kg ar seco;
- W_a Conteúdo de umidade do ar ambiente, kg vapor d'água/kg ar seco;
- A_{Du} Área superficial do corpo (DuBois), m².

Essas equações podem ser reduzidas usando-se inter-relações empíricas e aproximações, como aquela proposta em FANGER (1970) para estimar a vazão mássica pulmonar (m_{res}):

$$m_{res} = K_{res} \cdot M \quad (1.20)$$

onde:

- K_{res} Constante de proporcionalidade = 2,58 kg.m²/MJ;
- M Taxa de metabolismo, W.

O ar é expirado numa temperatura próxima à do corpo e está praticamente saturado; assim é possível utilizar as seguintes equações empíricas, desenvolvidas em FANGER (1970), para estimar as condições normais dos ambientes internos:

$$t_{ex} = 32,6 + 0,066 \cdot t_a + 32 \cdot W_a \quad (1.21)$$

$$W_{ex} - W_a = 0,0277 + 0,000065 \cdot t_a - 0,8 \cdot W_a \quad (1.22)$$

O conteúdo de umidade do ar ambiente (W_a) pode ser representado em termos da pressão total ou barométrica (p_t) e da pressão parcial de vapor no ar (p_a):

$$W_a = 0,622 \cdot \frac{p_a}{p_t - p_a} \quad (1.23)$$

onde: p_t e p_a são dados em kPa.

Duas aproximações são comuns para a simplificação das equações 1.18 e 1.19. A primeira é que t_{ex} é calculada pela expressão 1.21, considerando-se uma condição padrão de 20 °C, 50% de umidade e pressão ao nível do mar, isso porque a perda de calor sensível pela respiração é relativamente pequena quando comparada com os outros termos da equação de balanço térmico. A segunda aproximação é que o segundo termo da equação 1.22 e o denominador da equação 1.23 são também calculados para a condição padrão, tendo em vista a pequena dependência de t_a mostrada na expressão 1.22. Usando-se essas simplificações e substituindo os valores de h_{fg} e c_a na condição padrão, as equações 1.18 e 1.19 podem ser combinadas para se obter a perda total de calor pela respiração:

$$Q_{res} = C_{res} + E_{res} = 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) + 0,0173 \cdot M \cdot (5,87 - p_a) \quad (1.24)$$

onde:

Q_{res} Taxa total de calor perdido pela respiração, W/m².

2 OBJETIVOS

⇒ Explicar o método para avaliar o conforto térmico estabelecido na norma ISO 7730 (1994) e efetuar um relato sucinto sobre as normas por ela referenciadas;

⇒ Analisar a aplicação prática das normas acima citadas, discutindo os erros provenientes das estimativas de taxa de metabolismo e isolamento térmico das vestimentas e a sua influência na avaliação do conforto térmico;

⇒ Sugerir ações que solucionem ou minimizem os problemas identificados.

3 REVISÃO DE LITERATURA

A preocupação do homem com o conforto térmico é muito antiga. Um exemplo disso é a obra, citada por NEVINS (1966), "History and Art of Warming and Ventilation Rooms and Buildings" escrita por Walter Bernan e publicada em 1845. Nela o autor prevê que a criação e controle de ambientes climáticos artificiais assumirão a dimensão de uma ciência que contribuirá para o desenvolvimento da humanidade, para a preservação da saúde e longevidade do ser humano.

Os primeiros esforços organizados para o estabelecimento de critérios de conforto térmico, foram realizados no período de 1913 a 1923. Em 1923 a ASHVE, Associação Americana dos Engenheiros de Aquecimento e Ventilação, publicou o trabalho de HOUGHTEN & YAGLOU (1923) que estabelecia "linhas de igual conforto", definidas depois como de temperatura efetiva, e determinava a "zona de conforto". Nasce assim o Índice de Temperatura Efetiva.

Os experimentos que originaram esse índice foram desenvolvidos num laboratório que continha duas câmaras climatizadas interligadas por uma porta, mas com controles independentes de temperatura e umidade.

Numa das câmaras, chamada de controle, a temperatura era fixada num determinado valor e a umidade relativa mantida em 100% enquanto que na outra, chamada de teste, as temperaturas de bulbo seco e úmido eram alteradas, enquanto homens despidos até a cintura

andavam de uma câmara para outra. Em cada entrada na câmara de teste eles reportavam qual das câmaras estava mais quente. O ar nas duas câmaras foi mantido praticamente parado.

As temperaturas na câmara de teste eram alteradas progressivamente, desde uma sensação de leve frescor em relação à câmara de controle, até a de leve calor. O objetivo dos testes foi determinar as combinações das temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido que provocavam a mesma sensação térmica. Essas combinações originaram as chamadas linhas de igual conforto, que foram plotadas numa carta psicrométrica e chamadas de temperatura efetiva (ET). Essas linhas foram identificadas pelo correspondente valor da temperatura de bulbo seco no ponto do seu cruzamento com a linha de umidade relativa de 100 %.

Assim a sensação térmica de um ambiente com temperatura efetiva de 25°C corresponde à sensação de um ambiente com ar parado, umidade relativa de 100% e temperatura de 25°C. A ET é sempre numericamente inferior à temperatura de bulbo seco, exceto quando a umidade relativa for de 100%.

A "zona de conforto", ou o intervalo de conforto, foi estabelecida com experiências envolvendo 126 pessoas que usavam diferentes vestimentas, eram de ambos os sexos e representavam diferentes profissões. Os testes foram realizados numa câmara climatizada onde as pessoas ficavam sentadas lendo, escrevendo ou jogando cartas. A sensação térmica das pessoas era obtida através das respostas às seguintes perguntas :

- Essa condição é confortável ou desconfortável ?
- Você deseja alguma mudança ?
- Se deseja, você prefere mais quente ou mais frio ?

Foram utilizados diferentes tempos de exposição às condições de teste; dessa forma doze pessoas foram expostas por três horas, quatorze por duas horas e cem por quinze minutos.

Para se definir o intervalo de conforto foram incluídas as temperaturas efetivas em que pelo menos 50 % das pessoas sentiam-se confortáveis.

Experiências adicionais foram realizadas para incorporar os efeitos da velocidade do ar (HOUGHTEN & YAGLOU, 1924) e os da vestimenta (YAGLOU & MILLER, 1925). A vestimenta usada nos testes era composta de meias e roupa de baixo de algodão, camisa de algodão de manga longa com o colarinho abotoado, terno de lã com colete e sapatos.

O resultado dessas experiências foi um novo intervalo de conforto que indicou haver influência das estações do ano no conforto térmico das pessoas, devido às diferenças nas vestimentas utilizadas. Esse intervalo encontrado foi considerado válido para o período de inverno.

Em 1929, novas experiências foram feitas para determinar o efeito do clima de verão no intervalo de conforto (YAGLOU & DRINKER, 1929). Nesse caso foram usados cinqüenta e seis homens e trinta e cinco mulheres. Não foram feitas restrições quanto às vestimentas e os testes foram executados num período de três horas. A sensação térmica das pessoas foi obtida através do voto, usando a seguinte escala :

- 1- Frio
- 2 - Confortavelmente frio
- 3 - Muito confortável
- 4 - Confortavelmente quente
- 5 - Quente

O intervalo de conforto para o verão foi obtido incluindo todas as temperaturas votadas como confortáveis e não apenas as que satisfaziam pelo menos 50 % das pessoas.

As temperaturas efetivas foram então representadas em dois ábacos, um válido para pessoas despidas da cintura para cima, chamado de escala básica, e outro para pessoas

normalmente vestidas, chamado de escala normal. Nesses ábacos, as temperaturas efetivas eram obtidas em função da velocidade do ar e das temperaturas de bulbo seco e úmido (Figuras 3.1 e 3.2).

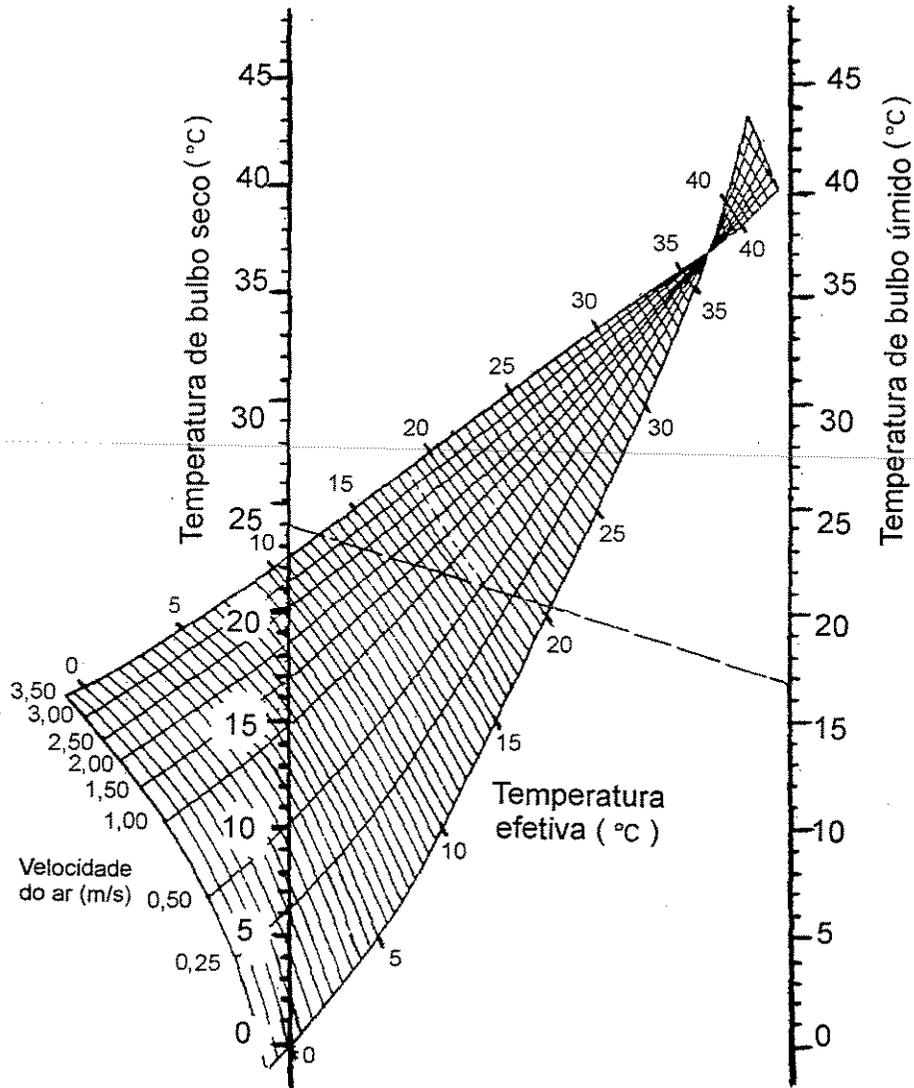


Figura 3.1 Escala de temperatura efetiva básica (para homens despidos da cintura para cima).

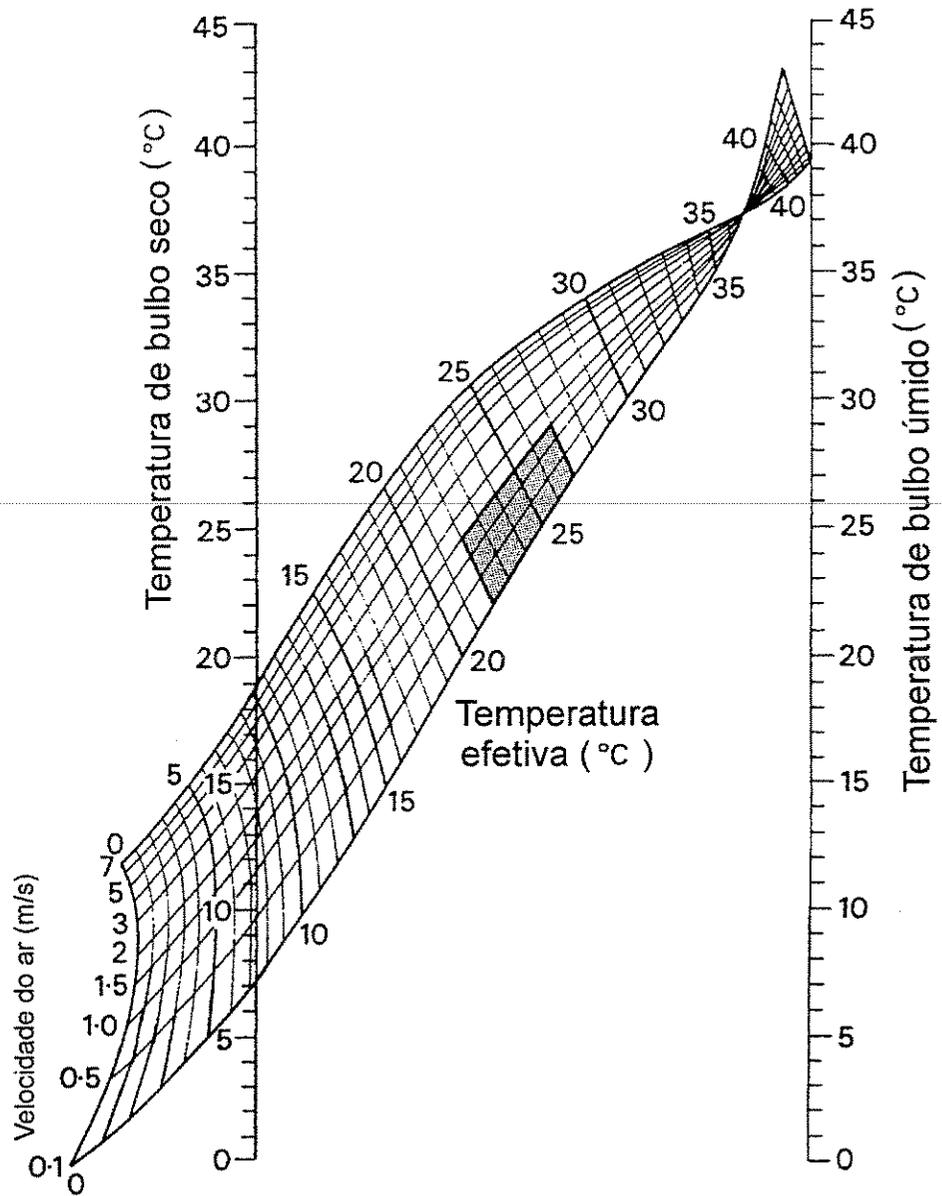


Figura 3.2 Escala de temperatura efetiva normal (para pessoas normalmente vestidas).

MCINTYRE (1980) define temperatura efetiva como um índice arbitrário que combina num único número o efeito da temperatura de bulbo seco, umidade e velocidade do ar na sensação térmica humana.

Em 1932 foi proposta uma correção para o índice das temperaturas efetivas para incluir o efeito da radiação térmica (VERNON & WARNER, 1932). A temperatura efetiva corrigida (CET) é então obtida nos ábacos de temperatura efetiva, substituindo a temperatura de bulbo seco pela temperatura do termômetro de globo.

A escala de temperatura efetiva foi usada sem restrições para avaliar o conforto térmico até 1947, quando surgiram evidências que essa escala superestimava o efeito da umidade nas baixas temperaturas e subestimava o efeito da umidade nas altas temperaturas, (YAGLOU, 1947 e ROWLEY, JORDAN & SNYDER, 1947).

MCINTYRE (1980) cita Yaglou (1949) para explicar que esse problema relacionado à umidade foi causado pelo método usado na pesquisa original que estabeleceu as linhas de temperatura efetiva. Segundo ele, para que fosse possível perceber diferenças de temperatura pequenas como 0,3 K, a sensação térmica das pessoas foi colhida imediatamente após a sua entrada na câmara de teste; isso fez com que a importância da umidade no conforto térmico fosse superestimada pelas seguintes razões:

1º Ao passar para uma sala com maior umidade, a vestimenta adsorve umidade, e a resultante liberação de calor de adsorção é sentida como um efeito transiente de aquecimento. Da mesma forma, ao entrar num ambiente com umidade menor, ocorre a evaporação da umidade da pele e da vestimenta, provocando um efeito de resfriamento.

2º Ao entrar num segundo ambiente imediatamente após sair de um primeiro, a umidade da pele é apropriada para o primeiro, provocando uma transiente mudança na perda de calor por evaporação.

Em 1950 a ASHRAE, Associação Americana dos Engenheiros de Refrigeração, Ar Condicionado e Aquecimento, iniciou o planejamento de um amplo programa de pesquisa para reavaliar os ábacos de conforto. Para tanto foi projetada e construída uma instalação de pesquisa ambiental do conforto térmico, no laboratório dessa associação em Cleveland (EUA).

Em 1960, experiências desenvolvidas no laboratório da ASHRAE em Cleveland (KOCH, JENNINGS & HUMPHREYS, 1960), mostraram que nos intervalos de umidade entre 20% e 90% e de temperatura de bulbo seco entre 20°C e 34°C, o efeito da umidade sobre a sensação de conforto é pequeno.

Nessas experiências o período de exposição às condições de teste foi de três horas e foram usadas vinte pessoas em atividade sedentária e vestindo roupa leve. A temperatura superficial das paredes da sala de teste foi mantida igual à temperatura do ambiente e a velocidade do ar menor ou igual a 0,1 m/s.

A comparação dos resultados dessas experiências com os de HOUGHTEN & YAGLOU (1923) mostra que a temperatura efetiva indica a sensação térmica imediatamente após a entrada no ambiente enquanto que os de KOCH, JENNINGS & HUMPHREYS (1960) refletem a sensação depois de três horas ou mais de exposição.

Em 1963, com a transferência do laboratório da ASHRAE de Cleveland (EUA) para a Universidade Estadual de Kansas (EUA), teve continuidade o programa de reavaliação dos intervalos de conforto vigentes.

O primeiro trabalho relevante então publicado foi o de ROHLES et al. (1966) que relatava a pesquisa desenvolvida por eles, no laboratório de Kansas, com 360 homens e 360 mulheres de idades entre 18 e 23 anos.

Nessa pesquisa foram formados setenta e dois grupos de dez pessoas, cinco homens e cinco mulheres, que foram expostos, por três horas, a diferentes condições de teste.

Os testes englobaram setenta e duas condições diferentes, que resultaram da combinação de nove temperaturas de bulbo seco, no intervalo de 66°F (18,9°C) a 82°F (27,8°C) com incremento de 2°F (1,1°C), com oito valores de umidade relativa, no intervalo de 15 % a 85 %, com incremento de 5 %.

As pessoas vestiam uma roupa padrão com resistência térmica de 0,52 clo¹ e executavam atividades sedentárias.

A sala de teste foi mantida com velocidade do ar inferior a 0,2 m/s e a temperatura superficial das paredes igual à temperatura de bulbo seco.

A sensação térmica das pessoas foi obtida através do voto escrito, que era colhido após uma hora de exposição e depois a cada meia hora até que fossem completadas as três horas. A escala usada foi a seguinte :

- 1 - Muito frio
- 2 - Frio
- 3 - Levemente frio
- 4 - Confortável
- 5 - Levemente quente
- 6 - Quente
- 7 - Muito quente

O resultado dessa pesquisa concordou com o anterior de KOCH, JENNINGS & HUMPHREYS (1960).

A pesquisa de ROHLES et al. (1966) foi repetida na Universidade da Dinamarca em 1968 (FANGER, 1970). Nessa oportunidade o objetivo era verificar a influência da nacionalidade

¹ 1 clo = 0,155 m² . K/W

e da idade no intervalo de conforto e para isso, foram usados nos testes 256 pessoas de ambos os sexos, sendo 128 com idade média de 23 anos e 128 com média de 68 anos.

De acordo com FANGER (1970), esses testes não demonstraram diferença significativa de condições de conforto entre jovens americanos e dinamarqueses, entre jovens e idosos e nem entre homens e mulheres.

O método utilizado nas pesquisas desenvolvidas até então basicamente verificava a influência da temperatura e umidade do ar na sensação de conforto térmico, uma vez que os outros fatores intervenientes, como a temperatura radiante média², a velocidade do ar, a vestimenta e a atividade física executada, eram mantidos constantes. Isso restringia a aplicação prática dos resultados dessas pesquisas, uma vez que eles só são válidos para condições semelhantes àsquelas usadas nos testes, ou seja atividade física sedentária, vestimenta com resistência térmica de 0,6 clo, velocidade do ar próxima a 0,1 m/s e temperatura radiante média igual à temperatura ambiente.

O estudo do conforto térmico foi ampliado com o trabalho de MCNALL et al. (1967) que determinou, usando quatrocentas e vinte pessoas de ambos os sexos e método similar ao de ROHLES et al. (1966), a temperatura de neutralidade térmica e o intervalo de conforto para homens e mulheres executando atividades leve, média e pesada.

A pesquisa sobre o conforto térmico teve um avanço significativo com a publicação do trabalho desenvolvido pelo professor dinamarquês Ole Fanger, (FANGER, 1967), quando da sua visita ao laboratório da ASHRAE no período de outubro de 1966 a abril de 1967.

Nesse período Fanger, utilizando o procedimento experimental descrito em MCNALL et al. (1967), realizou testes que, em conjunto com os resultados de experiências anteriores

² Temperatura radiante média é a temperatura superficial uniforme de um ambiente imaginário, negro sob o aspecto de radiação, no qual uma pessoa trocaria a mesma quantidade de calor por radiação que no ambiente real não uniforme.

(ROHLES et al., 1966 e MCNALL et al., 1967), permitiram relacionar, para a condição de conforto térmico, a atividade física, representada pelo calor produzido internamente pelo corpo humano, com a temperatura média da pele e com a quantidade de calor perdido por evaporação do suor. Essa relação é mostrada nas equações seguintes :

$$t_s = 35,7 - 0,032 H / A_{DU} \quad (3.1)$$

$$E_{sw} = 0,42 \cdot A_{DU} \cdot [(H / A_{DU}) - 50] \quad (3.2)$$

onde :

- t_s Temperatura média da pele, (°C);
- E_{sw} Calor perdido pela evaporação do suor, (kcal/h);
- H Calor interno produzido, (kcal/h);
- A_{DU} Área superficial do corpo, (m²).

Feito isso, e partindo da premissa de que para haver conforto térmico numa determinada atividade física, o corpo deve estar em equilíbrio térmico, com uma certa temperatura média de pele e perdendo certa quantidade de calor por evaporação do suor, Fanger elaborou uma equação de conforto que permitia, para uma determinada combinação das variáveis pessoais (tipo de atividade física e vestimenta), calcular todas as combinações das variáveis ambientais (temperatura radiante média, umidade relativa, velocidade relativa e temperatura do ar) que produzem o conforto térmico.

A equação de conforto de Fanger foi formulada a partir da seguinte expressão de equilíbrio térmico ou de balanço térmico do corpo humano:

$$H - E_d - E_{sw} - E_{re} - L = K = R + C \quad (3.3)$$

onde :

- H Calor produzido internamente no corpo humano;
- E_d Calor perdido por difusão do vapor d'água através da pele;
- E_{sw} Calor perdido por evaporação do suor;
- E_{re} Calor latente perdido na respiração;

- L Calor sensível perdido na respiração;
- K Calor perdido por condução da pele para a vestimenta;
- R Calor perdido por radiação;
- C Calor perdido por convecção.

O detalhamento de cada um dos termos da equação 3.3, conforme explicado em FANGER (1967 e 1970), resultou na seguinte expressão para o equilíbrio térmico do corpo humano:

$$\begin{aligned} & \frac{M}{A_{Du}}(1-\eta) - 0,35 \cdot [1,92 \cdot t_s - 25,3 - p_a] - \frac{E_{sw}}{A_{Du}} - 0,0023 \cdot \frac{M}{A_{Du}} \cdot (44 - p_a) - \\ & 0,0014 \cdot \frac{M}{A_{Du}} \cdot (34 - p_a) = \frac{t_s - t_{cl}}{0,18 \cdot I_{cl}} = 3,4 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot \left[(t_{cl} + 273)^4 - (t_{mrt} + 273)^4 \right] + \\ & f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \end{aligned} \quad (3.4)$$

onde :

- M Energia do metabolismo, (kcal/h);
- A_{Du} Área superficial do corpo, (m²);
- η Rendimento do trabalho mecânico externo;
- t_s Temperatura média da pele, (°C);
- p_a Pressão de vapor d'água no ar, (mmHg);
- E_{sw} Calor perdido por evaporação do suor, (kcal/h);
- t_{cl} Temperatura superficial da vestimenta, (°C);
- f_{cl} Fator de área da vestimenta ;
- I_{cl} Resistência térmica da vestimenta, (clo);
- h_c Coeficiente de transferência de calor por convecção, (kcal/h.m². °C);
- t_{mrt} Temperatura radiante média, (°C);
- t_a Temperatura do ambiente, (°C).

A equação de conforto de Fanger foi obtida substituindo as expressões 3.1 e 3.2 na equação 3.4. Essa equação é mostrada a seguir:

$$\begin{aligned}
& \frac{M}{A_{Du}}(1-\eta) - 0,35 \cdot [43 - 0,061 \cdot \frac{M}{A_{Du}} \cdot (1-\eta) - p_a] - 0,42 \cdot \left[\frac{M}{A_{Du}} \cdot (1-\eta) - 50 \right] - \\
& 0,0023 \cdot \frac{M}{A_{Du}}(44 - p_a) - 0,0014 \frac{M}{A_{Du}}(34 - t_a) = \frac{35,7 - 0,032 \frac{M}{A_{Du}}(1-\eta) - t_{cl}}{0,18 \cdot I_{cl}} = \\
& 3,4 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot \left[(t_{cl} + 273)^4 - (t_{mrt} + 273)^4 \right] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)
\end{aligned} \tag{3.5}$$

Como mostrado em FANGER (1970), a aplicação das condições usadas nas experiências de ROHLES et al. (1966) e MCNALL et al. (1967) na equação de conforto apresentou, para atividades sedentárias, excelente concordância de resultados quanto à temperatura e inter-relação temperatura - umidade. Para outras atividades, a concordância de temperatura foi boa, as diferenças foram menores que 1°C, mas quanto à inter-relação temperatura - umidade encontrou-se diferenças que foram atribuídas ao restrito intervalo de umidades relativas investigado, de 25% a 65%.

A equação de conforto é complexa e de difícil utilização, por isso FANGER (1967) obteve com a ajuda de um computador uma série de combinações das variáveis pessoais e ambientais que satisfaziam a sua equação, ou seja resultavam em conforto térmico, e as representou, através de linhas de conforto, em gráficos. Esses gráficos foram chamados de Diagramas de Conforto ; um deles é mostrado na figura 3.3.

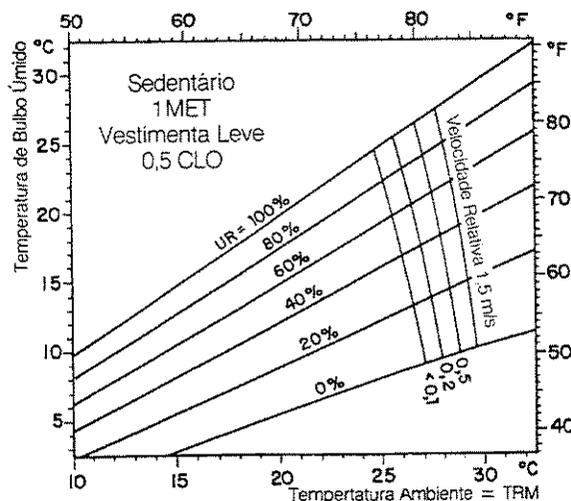


Figura 3.3 Diagrama de conforto de FANGER.

Os diagramas de conforto representam as combinações das variáveis que resultam em conforto térmico, todavia, sob o ponto de vista prático, era necessário conhecer-se o grau de desconforto experimentado pelas pessoas em ambientes que tivessem condições diferentes daquelas de conforto térmico. Assim FANGER (1970) definiu um critério para avaliar esse grau de desconforto, relacionando as variáveis que influenciam no conforto térmico com uma escala de sensação térmica definida por ele. Esse critério ele chamou de Predicted Mean Vote-PMV (Voto Médio Estimado-VME).

A escala de sensação térmica definida por FANGER tem os seguintes níveis:

- 3 - muito frio
- 2 - frio
- 1 - leve sensação de frio
- 0 - neutralidade térmica
- + 1 - leve sensação de calor
- + 2 - calor
- + 3 - muito calor

Essa escala é simétrica em relação ao ponto 0 (zero), que corresponde ao conforto térmico e apresenta valores de 1 a 3 que podem ser positivos, correspondendo às sensações de calor, ou negativos, correspondendo às sensações de frio.

A relação entre as sensações térmicas da escala estabelecida e as variáveis que influenciam o conforto térmico foi obtida partindo do princípio de que à medida em que as condições térmicas de um ambiente se afastam daquelas de conforto, o sistema termorregulador do corpo deve agir mais intensamente de forma a evitar variações significativas na temperatura interna. Esse maior trabalho do sistema termorregulador provoca maior desconforto.

Assim Fanger relacionou, para uma determinada atividade, a sensação de desconforto ao grau de atuação do sistema termorregulador, através de um índice que considerava o distanciamento das condições de conforto. Esse índice, denominado de Índice de Carga Térmica (ICT), é definido em FANGER (1970) como a diferença entre o calor produzido internamente para uma dada atividade e o calor que seria trocado em condições de neutralidade térmica, para a mesma atividade e mesmo ambiente.

A expressão matemática para o ICT foi formulada a partir da equação de conforto e é mostrada a seguir:

$$\begin{aligned} \text{ICT} = & \frac{M}{A_{\text{Du}}} \cdot (\eta - 1) - 0,35 \cdot \left[43 - 0,061 \cdot \frac{M}{A_{\text{Du}}} \cdot (\eta - 1) - p_a \right] - 0,42 \cdot \left[\frac{M}{A_{\text{Du}}} \cdot (\eta - 1) - 50 \right] - \\ & 0,0023 \cdot \frac{M}{A_{\text{Du}}} (44 - p_a) - 0,0014 \frac{M}{A_{\text{Du}}} (34 - t_a) - 3,4 \cdot 10^{-8} \cdot f_{\text{cl}} \cdot \left[(t_{\text{cl}} + 273)^4 - (t_{\text{mtt}} + 273)^4 \right] - \\ & f_{\text{cl}} \cdot h_c \cdot (t_{\text{cl}} - t_a) \end{aligned} \quad (3.6)$$

O ICT é igual a zero em condições de neutralidade térmica e cresce em valor absoluto a medida que o ambiente se afasta dessas condições.

Fanger considerou que o ICT era uma medida da atuação do sistema termorregulador e portanto que a sensação térmica era função desse índice. Dessa forma ele chamou o valor numérico da escala de sensações térmicas de PMV (Predicted Mean Vote ou Voto Médio Estimado) e estabeleceu a seguinte expressão matemática :

$$PMV = f(ICT, M) \quad (3.7)$$

onde :

ICT Índice de carga térmica.
M Energia do metabolismo.

A relação entre PMV, ICT e M foi encontrada por FANGER (1970) utilizando os resultados de experiências com 1396 pessoas que foram expostas, de forma controlada, a diversas combinações das variáveis ambientais e pessoais de conforto (ROHLES et al., 1966; MCNALL et al., 1967 e FANGER, 1970). Essa relação é mostrada abaixo :

$$PMV = \left(0,352 \cdot e^{-0,042 \left(\frac{M}{A_{Du}} \right)} + 0,032 \right) \cdot ICT \quad (3.8)$$

Fanger então substituiu a equação 3.6 na 3.8 e obteve a seguinte expressão para o Predicted Mean Vote ou Voto Médio Estimado :

$$\begin{aligned} PMV = & \left(0,0352 \cdot e^{-0,042 \left(\frac{M}{A_{Du}} \right)} + 0,032 \right) \cdot \left\{ \frac{M}{A_{Du}} \cdot (\eta - 1) - 0,35 \cdot \left[43 - 0,061 \cdot \frac{M}{A_{Du}} \cdot (\eta - 1) - p_a \right] - \right. \\ & 0,42 \cdot \left[\frac{M}{A_{Du}} \cdot (\eta - 1) - 50 \right] - 0,0023 \cdot \frac{M}{A_{Du}} (44 - p_a) - 0,0014 \frac{M}{A_{Du}} (34 - t_a) - \\ & \left. 3,4 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot \left[(t_{cl} + 273)^4 - (t_{mrt} + 273)^4 \right] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \right\} \end{aligned} \quad (3.9)$$

A equação do voto médio estimado, a exemplo da equação de conforto, é complexa e de difícil manipulação; assim, para aplicação prática, Fanger preparou uma tabela que fornece o voto médio estimado para a combinação de 8 diferentes níveis de atividade, 7 possibilidades de vestimenta, 9 velocidades relativas do ar e 8 temperaturas do ambiente. Uma parte dessa tabela é mostrada na tabela 3.1 a seguir:

Tabela 3.1 Parte da tabela dos Votos Médios Estimados de Fanger.

Grau de atividade física = 58,2 W/m ²										
Vestimenta cio	Temp. Ambiente °C	Velocidade relativa do ar (m/s)								
		< 0,10	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	1,00	1,50
0	26	- 1,62	- 1,62	- 1,96	- 2,34					
	27	- 1,00	- 1,00	- 1,36	- 1,69					
	28	- 0,39	- 0,42	- 0,76	- 1,05					
	29	0,21	0,13	- 0,15	- 0,39					
	30	0,80	0,68	0,45	0,26					
	31	1,39	1,25	1,08	0,94					
	32	1,96	1,83	1,71	1,61					
	33	2,50	2,41	2,34	2,29					
0,25	24	- 1,52	- 1,52	- 1,80	- 2,06	- 2,47				
	25	- 1,05	- 1,05	- 1,33	- 1,57	- 1,94	- 2,24	- 2,48		
	26	- 0,58	- 0,61	- 0,87	- 1,08	- 1,41	- 1,67	- 1,89	- 2,66	
	27	- 0,12	- 0,17	- 0,40	- 0,58	- 0,87	- 1,10	- 1,29	- 1,97	- 2,41
	28	0,34	0,27	0,07	- 0,09	- 0,34	- 0,53	- 0,70	- 1,28	- 1,66
	29	0,80	0,71	0,54	0,41	0,20	0,04	- 0,10	- 0,58	- 0,90
	30	1,25	1,15	1,02	0,91	0,74	0,61	0,50	0,11	- 0,14
	31	1,71	1,61	1,51	1,43	1,30	1,20	1,12	0,83	0,63
0,50	23	- 1,10	- 1,10	- 1,33	- 1,51	- 1,78	- 1,99	- 2,16		
	24	- 0,72	- 0,74	- 0,95	- 1,11	- 1,36	- 1,55	- 1,70	- 2,22	
	25	- 0,34	- 0,38	- 0,56	- 0,71	- 0,94	- 1,11	- 1,25	- 1,71	- 1,99
	26	0,04	- 0,01	- 0,18	- 0,31	- 0,51	- 0,66	- 0,79	- 1,19	- 1,44
	27	0,42	0,35	0,20	0,09	- 0,08	- 0,22	- 0,33	- 0,68	- 0,90
	28	0,80	0,72	0,59	0,49	0,34	0,23	0,14	- 0,17	- 0,36
	29	1,17	1,08	0,98	0,90	0,77	0,68	0,60	0,34	0,19
	30	1,54	1,45	1,37	1,30	1,20	1,13	1,06	0,86	0,73
0,75	21	- 1,11	- 1,11	- 1,30	- 1,44	- 1,66	- 1,82	- 1,95	- 2,36	- 2,60
	22	- 0,79	- 0,81	- 0,98	- 1,11	- 1,31	- 1,46	- 1,58	- 1,95	- 2,17
	23	- 0,47	- 0,50	- 0,66	- 0,78	- 0,96	- 1,09	- 1,20	- 1,55	- 1,75
	24	- 0,15	- 0,19	- 0,33	- 0,44	- 0,61	- 0,73	- 0,83	- 1,14	- 1,33
	25	0,17	0,12	- 0,01	- 0,11	- 0,26	- 0,37	- 0,46	- 0,74	- 0,90
	26	0,49	0,43	0,31	0,23	0,09	0,00	- 0,08	- 0,33	- 0,48
	27	0,81	0,74	0,64	0,56	0,45	0,36	0,29	0,08	- 0,05
	28	1,12	1,05	0,96	0,90	0,80	0,73	0,67	0,48	0,37
1,00	20	- 0,85	- 0,87	- 1,02	- 1,13	- 1,29	- 1,41	- 1,51	- 1,81	- 1,98
	21	- 0,57	- 0,60	- 0,74	- 0,84	- 0,99	- 1,11	- 1,19	- 1,47	- 1,63
	22	- 0,30	- 0,33	- 0,46	- 0,55	- 0,69	- 0,80	- 0,88	- 1,13	- 1,28
	23	- 0,02	- 0,07	- 0,18	- 0,27	- 0,39	- 0,49	- 0,56	- 0,79	- 0,93
	24	0,26	0,20	0,10	0,02	- 0,09	- 0,18	- 0,25	- 0,46	- 0,58
	25	0,53	0,48	0,38	0,31	0,21	0,13	0,07	- 0,12	- 0,23
	26	0,81	0,75	0,66	0,60	0,51	0,44	0,39	0,22	0,13
	27	1,08	1,02	0,95	0,89	0,81	0,75	0,71	0,56	0,48
1,25	16	- 1,37	- 1,37	- 1,51	- 1,62	- 1,78	- 1,89	- 1,98	- 2,26	- 2,41
	18	- 0,89	- 0,91	- 1,04	- 1,14	- 1,28	- 1,38	- 1,46	- 1,70	- 1,84
	20	- 0,42	- 0,46	- 0,57	- 0,65	- 0,77	- 0,86	- 0,93	- 1,14	- 1,26
	22	0,07	0,02	- 0,07	- 0,14	- 0,25	- 0,32	- 0,38	- 0,56	- 0,66
	24	0,56	0,50	0,43	0,37	0,28	0,22	0,17	0,02	- 0,06
	26	1,04	0,99	0,93	0,88	0,81	0,76	0,72	0,61	0,54
	28	1,53	1,48	1,43	1,40	1,34	1,31	1,28	1,19	1,14
	30	2,01	1,97	1,93	1,91	1,88	1,85	1,83	1,77	1,74
1,50	14	- 1,36	- 1,36	- 1,49	- 1,58	- 1,72	- 1,82	- 1,89	- 2,12	- 2,25
	16	- 0,94	- 0,95	- 1,07	- 1,15	- 1,27	- 1,36	- 1,43	- 1,63	- 1,75
	18	- 0,52	- 0,54	- 0,64	- 0,72	- 0,82	- 0,90	- 0,96	- 1,14	- 1,24
	20	- 0,09	- 0,13	- 0,22	- 0,28	- 0,37	- 0,44	- 0,49	- 0,65	- 0,74
	22	0,35	0,30	0,23	0,18	0,10	0,04	0,00	- 0,14	- 0,21
	24	0,79	0,74	0,68	0,63	0,57	0,52	0,49	0,37	0,31
	26	1,23	1,18	1,13	1,09	1,04	1,01	0,98	0,89	0,84
	28	1,67	1,62	1,58	1,56	1,52	1,49	1,47	1,40	1,37

Fonte :adaptado de FANGER (1970)

Fanger também relacionou o voto médio estimado com a porcentagem estimada de insatisfeitos. Essa relação é representada pela curva da figura 3.4.

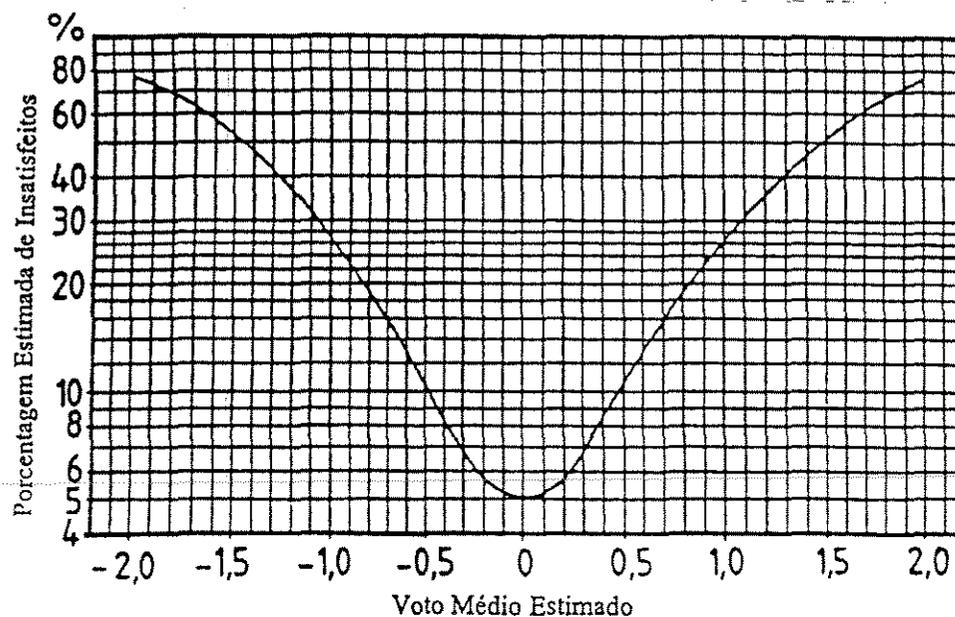


Figura 3.4 Porcentagem de insatisfeitos em função do PMV.

A análise da curva da figura 3.4 permite verificar que:

- É impossível obter num ambiente uma combinação das variáveis de conforto que satisfaça plenamente a todos os integrantes de um grande grupo. A condição de neutralidade térmica ($PMV = 0$) corresponde a 5% de insatisfeitos.
- A curva é simétrica em relação ao ponto de $PMV = 0$, significando que sensações equivalentes de calor e de frio (mesmo PMV em valores absolutos), correspondem a igual porcentagem de insatisfeitos.

A pesquisa de ROHLES et al. (1966) foi posteriormente repetida, (ROHLES & NEVINS, 1971), com oitocentos homens e oitocentas mulheres de idades entre 18 e 24 anos.

O método usado nessa pesquisa foi o mesmo da anterior, só que nessa oportunidade foram testadas cento e sessenta condições que resultaram da combinação de vinte temperaturas de bulbo seco, no intervalo de 60°F (15,6°C) a 98°F (36,7°C) com incremento de 2°F (1,1°C), com oito valores de umidade relativa, no intervalo de 15 % a 85 % com incremento de 5 %. A vestimenta padrão utilizada tinha resistência térmica de 0,6 clo.

As conclusões dessa pesquisa foram as seguintes :

1° Para as condições testadas, a distribuição dos votos foi normal.

2° Os homens precisam de aproximadamente uma hora e meia para se adaptarem ao ambiente enquanto as mulheres conseguem isso muito mais rapidamente.

3° Para um determinado ambiente térmico, os homens sentem mais calor que as mulheres durante a primeira hora de exposição e assim, isso deve ser considerado nos ambientes em que a permanência é menor ou igual a uma hora.

4° Existe uma inter-relação linear entre temperatura, umidade e sensação térmica que depende do sexo. A influência da temperatura na sensação térmica dos homens é quase sete vezes maior que a da umidade, enquanto que no caso das mulheres a influência da temperatura na sensação térmica é nove vezes maior que a da umidade.

Em 1971 foi proposta uma nova escala de temperatura efetiva (ET*), (GAGGE, STOLWIJK & NISHI, 1971), baseada num modelo fisiológico da regulação térmica humana o qual tem a superfície molhada da pele, a temperatura interna do corpo e a temperatura média da pele como principais parâmetros associados à sensação térmica. Esse modelo, que considera que

a regulação da temperatura corporal é controlada pela temperatura interna do corpo e pela temperatura média da pele, foi chamado de "modelo dos dois nós".

A ET^* corresponde à temperatura uniforme de um ambiente imaginário com umidade relativa de 50% e ar parado, no qual uma pessoa trocaria a mesma quantidade de calor por radiação, convecção e evaporação, que no ambiente real, considerando o mesmo teor de superfície molhada e temperatura média da pele.

A ET^* é representada graficamente em função da temperatura do ar, da temperatura radiante média e da umidade. A representação é através de linhas onde o teor de umidade da pele é constante. Essas linhas são numericamente identificadas pelo correspondente valor da temperatura do ar no ponto do seu cruzamento com a linha de umidade relativa de 50 %. Os gráficos são específicos para cada combinação de vestimenta, atividade física e velocidade do ar, tendo em vista que é impossível criar um ábaco universal devido a dependência da ET^* dessas variáveis.

As normas ASHRAE 55 (1974, 1981 e 1992) adotaram a ET^* para delimitar o intervalo de conforto.

A obtenção da ET^* para uma determinada condição exige a solução de múltiplas equações que dificultam a sua aplicação prática. Assim condições padrão, representativas de ambientes internos típicos, foram usadas para definir a Temperatura Efetiva Standard (SET) (GAGGE, NISHI & GONZALEZ, 1972).

A SET é a temperatura uniforme de um ambiente imaginário com ar parado, umidade relativa de 50% e temperatura igual à temperatura radiante média, no qual uma pessoa com vestimenta padrão para aquela atividade, com a mesma temperatura média e teor de superfície molhada da pele, teria a mesma perda de calor que no ambiente real. A atividade é a mesma no ambiente real e no imaginário e a vestimenta é padrão para aquela atividade.

O isolamento térmico da vestimenta padrão é matematicamente relacionado ao metabolismo; assim para atividades com metabolismo de $58,2 \text{ W/m}^2$, $116,4 \text{ W/m}^2$ e 174 W/m^2 corresponderiam, respectivamente, vestimentas padrão com isolamento térmico básico de 0,67 clo, 0,39 clo e 0,26 clo.

O valor de ET^* é igual ao da SET para o caso de atividade sedentária ($M=58,2 \text{ W/m}^2$), vestimenta leve (0,67 clo) e baixa velocidade do ar. Assim, como exemplifica MCINTYRE (1980), uma pessoa sentada, vestindo roupa leve num ambiente com baixa velocidade do ar ($< 0,2 \text{ m/s}$) e temperatura de 24°C está numa SET igual a 24°C . Se essa pessoa tirar a roupa a SET cai para 20°C , porque a temperatura média da sua pele passa a ser igual a de uma pessoa com vestimenta padrão num ambiente com temperatura do ar de 20°C .

A ET^* foi correlacionada à escala de sensações térmicas da ASHRAE, (ROHLES, HAYTER & MILLIKEN, 1975), o que possibilitou construir uma curva para estimar a porcentagem de insatisfeitos em função da ET^* . Essa curva não apresentava a simetria de insatisfação por calor e por frio encontrada em FANGER (1970) ; essa diferença foi explicada como reflexo do uso de um intervalo de temperaturas mais amplo que o de Fanger.

Em 1984 o modelo de Fanger, PMV e PPD, foi adotado como base para a norma internacional, ISO 7730 (1984). Essa norma é indicada para a avaliação de ambientes térmicos moderados, isto é, aqueles nos quais a combinação das variáveis ambientais e pessoais de conforto resultam num PMV dentro do intervalo de -2 a +2.

As prescrições dessa norma não consideram só o desconforto térmico do corpo como um todo, mas também os que ocorrem em partes localizadas. Os limites especificados foram baseados na premissa que um ambiente só é confortável se pelo menos 80% dos ocupantes estão satisfeitos.

Na ISO 7730 (1984), o PMV e os intervalos de conforto para o verão e para o inverno são dados em função de um índice térmico chamado de temperatura operante (t_o).

A t_o é definida como a temperatura uniforme de um ambiente imaginário no qual uma pessoa trocaria o mesmo calor por radiação e convecção que no ambiente real não uniforme. A t_o pode ser calculada pela equação abaixo :

$$t_o = A.t_a + (1-A).t_{rm} \quad (3.10)$$

sendo :

$$\begin{cases} A = 0,5 \text{ para } v_a < 0,2\text{m/s} ; \\ A = 0,6 \text{ para } 0,2 < v_a < 0,6\text{m/s} ; \\ A = 0,7 \text{ para } 0,7 < v_a < 1,0\text{m/s}. \end{cases}$$

onde :

- A Coeficiente;
- t_a Temperatura do ar, (°C);
- t_{rm} Temperatura radiante média, (°C);
- v_a Velocidade do ar, (m/s).

A partir de 1984 várias pesquisas foram feitas para testar o modelo adotado pela ISO 7730 (1984) uma vez que existiam dúvidas quanto à validade dos seus resultados para aplicações de campo e para diferentes regiões climáticas. Isso foi devido ao fato dessa norma ter sido baseada exclusivamente em dados obtidos em laboratório e em regiões climáticas de latitude média.

As experiências de DE DEAR & AULICIEMS(1985) realizadas em seis prédios de escritórios, situados em diferentes regiões climáticas da Austrália, concluíram que a técnica proposta pela ISO não pode ser usada universalmente, uma vez que as temperaturas de neutralidade térmica obtidas foram de 0,5 a 3,2°C inferiores às previstas pelo PMV (Predicted Mean Vote).

É importante ressaltar que a comparação dos resultados das pesquisas de campo com os de laboratório tem que ser realizada com cuidado, tendo em vista as limitações da instrumentação e dos métodos adotados até então nas pesquisas de campo. Os experimentos de campo evoluíram significativamente com o trabalho de SCHILLER et al. (1988), realizado em dez prédios de

escritórios, com e sem ar condicionado, em São Francisco durante o inverno de 1987 e o verão seguinte.

A comparação das sensações térmicas obtidas nessa pesquisa com uma estimativa feita através da norma ISO 7730 (1984) foi apresentada em SCHILLER (1990) e BRAGER (1992). A conclusão desses trabalhos foi de que as sensações térmicas são subestimadas de 0,5 a 1,0 unidades pelo PMV, sendo que a maior diferença é observada nas temperaturas inferiores à neutra. A temperatura neutra observada foi 2,4°C inferior à estimada pela ISO e a porcentagem de insatisfeitos correspondente à neutralidade foi de 12% contra os 5% estabelecidos na norma.

De acordo com OLESEN (1993) essas diferenças entre os resultados das pesquisas de campo e a norma ISO 7730 (1984), baseada em dados laboratoriais, deve ser esperada, visto que em campo é difícil estimar com exatidão as variáveis pessoais (vestimenta e atividade física).

Olesen acrescenta também que as pesquisas de campo não incluem no cálculo da resistência térmica das vestimentas o isolamento provocado pelas cadeiras, quando na posição sentado. Considerando que esse isolamento pode representar um adicional de 0,15 clo numa vestimenta de verão de 0,5 clo, então o seu efeito seria equivalente a um aumento de 1,5°C na temperatura operante.

Olesen também explica que embora os trabalhos de campo em escritórios tenham adotado uma atividade física entre 1,1 e 1,2 met³, essa atividade varia no tempo e cita WYON (1975) para afirmar que o trabalho mental pode elevar uma atividade sedentária até 1,3 met. Um aumento de 0,1 met na energia do metabolismo de uma pessoa em atividade sedentária e vestindo roupa leve (0,5 clo) tem o mesmo impacto que um aumento de 0,7°C na temperatura operante.

DE DEAR & FOUNTAIN (1994) repetiram a experiência de SCHILLER et al. (1988) em doze edifícios de escritórios com ar condicionado em Townsville, norte tropical da Austrália.

³ met – unidade de taxa de metabolismo. 1 met = 58,2 W/m²; é igual a energia produzida por unidade de área superficial do corpo de uma pessoa descansando na posição sentada.



O objetivo do experimento foi obter dados em uma outra região climática e compará-los com uma estimativa feita com a norma ISO 7730 (1984) e com os resultados de SCHILLER et al. (1988).

DE DEAR & FOUNTAIN (1994) estimaram a energia do metabolismo das atividades de escritório, em média, igual a 1,3 met e consideraram um adicional de 0,15 clo na resistência térmica das vestimentas devido ao isolamento provocado pelas cadeiras. Esse adicional está de acordo com o intervalo de 0,1 a 0,3 clo, encontrado posteriormente por MCCULLOUGH; OLESEN & HONG (1994).

Os resultados dessa experiência apontaram uma temperatura de máxima aceitabilidade 2°C superior à encontrada por SCHILLER (1988) o que mostrou ótima concordância com a temperatura neutra estimada pela norma ISO 7730 (1984), embora essa temperatura encontrada tenha correspondido a 10% de insatisfeitos enquanto a norma relaciona a neutralidade a 5% de descontentes.

DE DEAR & FOUNTAIN (1994) não encontraram diferença nas temperaturas neutras de homens e mulheres, mas verificaram maior frequência de insatisfação com o ambiente por parte das mulheres, o que representa uma pequena diferença nas sensações térmicas. Isso concorda com o trabalho de MODERA (1993) que observou, para condição de neutralidade térmica, a existência de diferenças estatisticamente significativas entre as respostas fisiológicas de homens e mulheres em relação à atividade. Modera concluiu que, para atividades sedentárias, essa diferença tem pouco significado para a engenharia.

As clássicas experiências em laboratório que formam a base da ISO 7730 (1984) (ROHLES et al., 1966; MCNALL et al., 1967 e FANGER, 1970) foram repetidas em países de climas diferentes, (TANABE , KIMURA & HARA, 1987 ; CHUNG & TONG, 1990 e DE DEAR, LEOW & AMEEN, 1991), sendo que os resultados não apontaram diferenças significativas, $\pm 0,7^{\circ}\text{C}$, em relação às temperaturas neutras obtidas anteriormente.

As experiências realizadas por ROWE, LAMBERT & WILKE (1995) e por ROWE (1995) em Sydney, região de clima temperado da Austrália, concluíram que a proporção de insatisfeitos é alta quando a temperatura excede 26 °C, limite superior de conforto para o verão, segundo a norma ISO 7730 (1984). Os experimentos foram feitos em edifícios de escritório, com e sem ar condicionado.

Por outro lado, algumas pesquisas realizadas em regiões de clima tropical (BUSCH, 1992; JAMY, 1995 e KARYONO, 1995) indicaram que as pessoas acostumadas a esses climas são mais tolerantes ao calor que as de clima temperado. Essa conclusão está relacionada aos intervalos de conforto encontrados, que superaram o limite superior para o verão especificado pela ISO 7730 (1984).

TANABE & KIMURA (1994) apresentaram uma revisão dos efeitos da temperatura do ar, da umidade e da velocidade do ar no conforto térmico em climas quentes e úmidos. Esse trabalho foi baseado em experiências laboratoriais japonesas e concluiu que o PMV superestima a sensação térmica quando a velocidade do ar é superior a 0,5m/s e que o PMV não expressa adequadamente a sensação de conforto em condições de umidade alta porque a porcentagem de insatisfeitos é significativamente maior quando a umidade é 80% do que a 40% e 60%.

Em 1994 a norma internacional foi atualizada (ISO 7730, 1994). Essa nova versão incluiu a limitação da umidade relativa ao intervalo entre 30 e 70%, modificou as recomendações para a velocidade média do ar em atividades sedentárias, que passou a ser dada em função da temperatura do ar e da intensidade da turbulência, e trouxe referência para o cálculo do isolamento térmico adicional provocado pelas cadeiras.

No Brasil as pesquisas de SÁ (1934); SÁ (1936), RIBEIRO (1945) e XAVIER & LAMBERTS (1997) foram as únicas encontradas sobre índices para avaliação de conforto térmico. A análise dos trabalhos de Sá e de Ribeiro mostra que, a despeito das dificuldades existentes para obtenção de informações no período de 1934 a 1945, o conhecimento sobre esse assunto no Brasil estava atualizado.

O estudo de Xavier e Lamberts foi realizado nas salas de aula da Escola Técnica Federal de Santa Catarina e com os alunos desempenhando atividade exclusivamente escolar. O experimento foi desenvolvido durante os meses de abril a julho e concluiu que embora a temperatura de neutralidade térmica⁴ encontrada (23,24°C) esteja bem próxima daquela estimada através da ISO 7730 (23,61°C), a porcentagem de insatisfeitos correspondente (19,96%) é superior ao previsto pela norma (5%).

Recentemente, os trabalhos de RUAS & LABAKI (1998) e de BEYER & SALVADORETTI (1998) também trataram do tema avaliação de conforto térmico. O primeiro faz um alerta sobre a imprecisão da estimativa da taxa de metabolismo e do isolamento térmico das vestimentas nas aplicações de campo e o reflexo disso nos resultados obtidos com a ISO 7730 (1994). O segundo traz as equações matemáticas das trocas de calor do corpo e o ambiente e mostra um exemplo da aplicação delas num programa computacional para a avaliação do conforto térmico.

Da literatura nacional que trata da avaliação de conforto térmico, FROTA & SCHIFFER (1995); MACINTYRE (1990); MESQUITA, GUIMARÃES & NEFUSSI (1985); JABARDO (1984) e GUIMARÃES & NEFUSSI (1979), a mais atualizada é JABARDO que apresenta resumidamente os conceitos que formam a base da ISO 7730 (1984).

Quanto à normalização, o Brasil dispõe da NBR 6401 (1980), que estabelece parâmetros para o projeto de instalações de ar condicionado para conforto. Nela estão especificados intervalos de temperatura do ambiente e umidade relativa para o conforto térmico de pessoas em atividade sedentária. Embora a norma não faça referência quanto à influência da temperatura radiante média, da velocidade do ar, da vestimenta e da atividade física no conforto, os intervalos recomendados não estão em desacordo com a ISO 7730 (1994), como pode ser visto na tabela 3.2:

⁴ Temperatura de neutralidade térmica é aquela correspondente à mínima porcentagem de insatisfeitos.

Tabela 3.2 Comparativo entre os intervalos de conforto recomendados pela NBR 6401 (1980) e ISO 7730 (1994).

	NBR 6401(1980)		ISO 7730 (1994)	
	⁽¹⁾ t_{bs} (°C)	⁽²⁾ UR (%)	⁽³⁾ t_o (°C)	⁽²⁾ UR (%)
Verão	23 a 25	40 a 60	23 a 26	30 a 70
Inverno	20 a 22	35 a 65	20 a 24	30 a 70

(1) t_{bs} = temperatura de bulbo seco

(2) UR = umidade relativa

(3) t_o = temperatura operante

4 ANÁLISE TEÓRICA

A ISO 7730 (1994) aplica-se a indivíduos sadios e tem como objetivo apresentar um método para prognosticar a sensação térmica e a proporção de pessoas insatisfeitas quando expostas a ambientes térmicos moderados, bem como especificar condições ambientais aceitáveis para o conforto térmico. Ela é indicada no projeto de ambientes novos, como também na avaliação dos já existentes e embora tenha sido elaborada para os ambientes laborais pode ser aplicada a outros.

A avaliação do conforto térmico por essa norma exige o conhecimento de outras como: ISO 7726 (1985) que especifica métodos e características dos instrumentos para avaliação do conforto térmico, ISO 8996 (1990) que descreve métodos para obtenção da taxa de metabolismo e ISO 9920 (1995) que apresenta métodos para estimar as características térmicas das vestimentas. No entanto, isso muitas vezes não é suficiente para se obter resultados confiáveis porque, devido à abrangência do assunto, existem fatores que influenciam nos resultados e que não são tratados com profundidade pelas normas.

Assim o objetivo dos itens seguintes é explicar o método de avaliação do conforto térmico estabelecido na norma ISO 7730 (1994), efetuar um relato sucinto sobre as normas por ela referenciadas bem como analisar a aplicação prática das normas acima citadas, discutindo os erros provenientes das estimativas de taxa de metabolismo e isolamento térmico das vestimentas e a sua influência na avaliação do conforto térmico.

4.1 AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO PELA ISO 7730 (1994)

O método de avaliação adotado por essa norma é o dos Votos Médios Estimados (PMV) que foi baseado em estudos realizados em câmaras climatizadas nos Estados Unidos da América e na Dinamarca (ROHLES et al., 1966; MCNALL et al., 1967 e FANGER, 1970). Essas experiências foram posteriormente repetidas em países de climas diferentes, (TANABE, KIMURA & HARA, 1987; CHUNG & TONG, 1990 e DE DEAR, LEOW & AMEEN, 1991) e os resultados obtidos concordaram com os anteriores.

O PMV é dado numa escala de sete pontos (+3 muito calor, +2 calor, +1 leve calor, 0 conforto, -1 leve frio, -2 frio, -3 muito frio) e representa uma estimativa da sensação térmica média de um grande grupo de pessoas. Ele é obtido utilizando as variáveis ambientais (temperatura radiante média, umidade relativa, temperatura e velocidade relativa do ar) e as variáveis pessoais (taxa de metabolismo e isolamento térmico da vestimenta).

A ISO 7730 (1994) traz o modelo matemático que permite calcular o PMV utilizando essas variáveis, mas também possui um conjunto de tabelas que possibilita obtê-lo diretamente para diferentes combinações de taxa de metabolismo, isolamento térmico da vestimenta, temperatura operante e velocidade relativa do ar.

Assim, medindo-se ou estimando-se essas variáveis num ambiente, consegue-se com a ISO 7730 (1994) prever a sensação térmica de um grupo de pessoas (PMV) e a correspondente Porcentagem Estimada de Insatisfeitos (PPD) que pode ser calculada ou obtida graficamente através do PMV.

Para a medição das variáveis ambientais é indicada a ISO 7726 (1985) que especifica as características mínimas dos instrumentos e os métodos a serem utilizados, exceto para o caso da velocidade relativa do ar. Essa velocidade é a que efetivamente atua sobre o corpo humano, sendo, portanto, a resultante de duas componentes: uma é a velocidade do ar incidente sobre a pessoa, considerando-a parada, e a outra é em razão do movimento do corpo na realização de uma tarefa, considerando agora o ar parado.

A velocidade relativa do ar pode ser medida com um anemômetro omnidirecional com características especificadas na ISO 7726 (1985) ou calculada. A ISO 7730 (1994) estima que a velocidade relativa do ar (v_{ar}) devido ao movimento do corpo é zero para as atividades sedentárias ($M \leq 1$ met) e $v_{ar} = 0,3 \cdot (M-1)$ para $M > 1$ met, sendo v_{ar} dada em m/s.

Para a estimativa das variáveis pessoais a ISO 7730 (1994) traz as seguintes tabelas :

Tabela 4.1 Taxas de metabolismo propostas pela ISO 7730 (1994).

Atividade	Metabolismo	
	(W/m ²)	(met)
Reclinado	46	0,8
Sentado, relaxado	58	1,0
Atividade sedentária (escritório, residência, escola, laboratório)	70	1,2
Em pé, atividade leve (compras, laboratório, indústria leve)	93	1,6
Em pé, atividade média (trabalho com máquina, doméstico)	116	2,0
Andando em superfície nivelada		
2 km/h	110	1,9
3 km/h	140	2,4
4 km/h	165	2,8
5 km/h	200	3,4

Tabela 4.2 Isolamento térmico para peças de roupa de acordo com a ISO 7730 (1994).

Peças de roupa	Isolamento térmico (clo)
Roupa de baixo	
calcinha	0,03
ceroula longa	0,10
camiseta sem manga	0,04
camiseta com manga curta	0,09
camiseta com manga longa	0,12
calcinha e sutiã	0,03
Camisa-blusa	
mangas curtas	0,15
leve, mangas longas	0,20
normal, mangas longas	0,25
camisa de flanela, mangas longas	0,30
blusa leve, mangas longas	0,15
Calça	
shorts	0,06
leve	0,20
normal	0,25
flanela	0,28
Vestido-saia	
saia leve (verão)	0,15
saia pesada (inverno)	0,25
vestido leve, mangas curtas	0,20
vestido de inverno, mangas longas	0,40
Sueter	
colete sem manga	0,12
sueter leve	0,20
sueter	0,28
sueter pesado	0,35
Paletó	
leve, paletó de verão	0,25
paletó	0,35
guarda-pó	0,30
Alto isolamento, fibra-pele	
calça	0,35
paletó	0,40
colete	0,20
Roupa para ambientes externos	
casaco	0,60
jaqueta	0,55
casaco com capuz	0,70
macacão, fibra-pele	0,55
Diversas	
meias	0,02
meias grossas, altura do tornozelo	0,05
meias grossas, longas	0,10
meias femininas de nylon	0,03
sapatos (sola fina)	0,02
sapatos (sola grossa)	0,04
botas	0,10
luvas	0,05

A taxa de metabolismo de um determinado trabalho é estimada enquadrando-o numa das atividades listadas na tabela 4.1 ou para o caso de trabalho composto por atividades diferentes, ponderando-se as taxas de cada atividade executada em relação ao tempo por um período de uma hora.

O isolamento térmico de uma vestimenta é estimado somando-se os isolamentos das peças que a compõem extraídos da tabela 4.2.

Para informações mais detalhadas sobre taxa de metabolismo e isolamento térmico das vestimentas são recomendadas, respectivamente, as normas ISO 8996 (1990) e ISO 9920 (1995).

A ISO 8996 (1990) descreve três métodos para a obtenção da taxa de metabolismo. O primeiro usa tabelas onde o metabolismo é estimado em função da descrição das atividades. O segundo método usa a taxa de batimentos cardíacos, que é registrada durante a execução da atividade e linearmente relacionada à produção de calor metabólico. O terceiro método utiliza o consumo de oxigênio e a produção de gás carbônico durante a atividade para calcular o calor metabólico produzido.

A ISO 9920 (1995) apresenta métodos para estimar as características térmicas das vestimentas (resistência a troca de calor sensível e latente) a partir de valores correspondentes a peças de vestuário conhecidas. Esses valores são listados em tabelas e foram obtidos em câmaras climatizadas com a realização de medições em manequim térmico. A influência do movimento do corpo e da penetração do ar no isolamento térmico e na resistência à troca de calor latente também é tratada nessa norma.

A ISO 7730 (1994) define conforto térmico como o estado de espírito que exprime satisfação com o ambiente térmico e considera que a insatisfação pode ocorrer em razão do aquecimento ou resfriamento do corpo como um todo ou de partes determinadas, o que recebe a designação de desconforto localizado.

Um tipo característico de desconforto localizado é o *draught* que é o resfriamento de uma parte do corpo, causado pelo ar em velocidade e ou temperatura inadequados. A ISO 7730 (1994) apresenta uma equação que permite calcular a porcentagem de insatisfeitos devido ao *draught* em função da temperatura, velocidade do ar e intensidade de turbulência. Essa equação é aplicável a pessoas em atividade leve, principalmente sedentária, com sensação térmica, no corpo como um todo, próxima da neutralidade.

O desconforto localizado também pode ser causado por grandes diferenças entre as temperaturas nas alturas da cabeça e do tornozelo, por grande assimetria de temperatura radiante ou pelo contato com superfícies frias ou quentes. A ISO 7730 (1994) recomenda limites para esses tipos de desconforto nas atividades leves.

A ISO 7730 (1994) especifica que um ambiente é aceitável no que se refere ao conforto térmico se a porcentagem de pessoas insatisfeitas devido ao desconforto no corpo como um todo for menor que dez por cento ($PPD < 10\%$) e os insatisfeitos devido ao *draught* forem menos que quinze por cento. A norma cita que devido às diferenças individuais, é impossível estabelecer condições de conforto térmico que satisfaçam a todos num grande grupo.

4.2 APLICAÇÃO PRÁTICA DA ISO 7730(1994)

A avaliação do conforto térmico pela norma ISO 7730 (1994) exige o conhecimento das variáveis ambientais (temperatura radiante média, umidade relativa, temperatura e velocidade relativa do ar) e das variáveis pessoais (taxa de metabolismo e isolamento térmico da vestimenta). A exatidão dos resultados da avaliação por essa norma depende da exatidão dos valores daquelas variáveis uma vez que o PMV é um modelo matemático baseado em experiências de laboratório onde todas as variáveis foram cuidadosamente controladas.

A ISO 7726 (1985) especifica as características mínimas dos instrumentos e os métodos que, se forem adequadamente utilizados, propiciarão a exatidão desejada no levantamento das variáveis ambientais.

Já para a obtenção das variáveis pessoais nas aplicações de campo, é difícil conseguir a exatidão necessária, visto que os recursos técnicos exigidos para medi-las geralmente não estão disponíveis. Assim essas variáveis são normalmente estimadas através de tabelas como as dos anexos A e E da ISO 7730 (1994) ou as da ISO 9920 (1995) e ISO 8996 (1990) e isso pode gerar erros na avaliação do conforto térmico.

4.3 INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS PESSOAIS NO CONFORTO TÉRMICO

O homem produz a energia necessária para a manutenção das suas funções vitais através do processo metabólico de degradação dos alimentos. Esse processo pode ser comparado a uma lenta queima de produtos devido ao consumo de oxigênio.

A maior parte da energia produzida pelo metabolismo é convertida em energia térmica e desse modo a parcela mecânica pode ser negligenciada, considerando-se o calor metabólico igual à taxa de metabolismo

O processo metabólico libera calor continuamente e a sua produção é maior com o aumento da atividade física executada. Dessa forma a taxa de metabolismo representa a quantidade de calor que o sistema termorregulador precisa trocar com o ambiente para que o equilíbrio térmico do corpo possa ser mantido e assim é um dos fatores determinantes do trabalho desse sistema.

A sensação de conforto térmico é inversamente proporcional ao trabalho do sistema termorregulador; isso representa que quanto maior for o trabalho desse sistema para manter a temperatura interna do corpo, maior será o desconforto.

O sistema termorregulador atua através de ações fisiológicas que interferem nas trocas de calor do corpo com o meio.

A outra variável pessoal, isolamento térmico da vestimenta, interfere com o trabalho do sistema termorregulador devido à barreira imposta pela roupa às trocas de calor do corpo. A magnitude dessa interferência depende principalmente do tecido e do modelo de fabricação da roupa.

4.4 ESTABELECIMENTO DA TAXA DE METABOLISMO

Como tratado no item anterior, a taxa de metabolismo representa a quantidade de calor que o sistema termorregulador precisa trocar com o ambiente para que o equilíbrio térmico do corpo possa ser mantido

O calor produzido no corpo é resultado da assimilação e utilização do alimento como fonte de energia e assim o potencial calorífico da alimentação ingerida é uma medida do calor que será liberado.

Dessa forma, através da calorimetria humana é possível medir diretamente o calor produzido. Esse método, no entanto, exige grande disponibilidade de tempo e só permite medidas integradas num longo período; isso dificulta a sua utilização prática.

A ingestão alimentar causa um aumento na produção interna de calor que é denominado ação dinâmica específica ou efeito ADE. A magnitude desse efeito depende tanto da quantidade

quanto do tipo de alimento ingerido. As proteínas provocam o maior efeito, seguidas pelos carboidratos com influência substancialmente menor e pelas gorduras com efeito ainda menor.

FANGER (1970) cita PASSMORE⁵ para afirmar que o efeito ADE de uma dieta balanceada pode produzir um aumento no metabolismo que corresponde a até 15% da taxa de metabolismo basal. O aumento será maior se a alimentação for rica em proteínas.

FANGER (1970) explica que o pico do efeito ADE ocorre uma ou duas horas após a refeição mas o efeito persiste por um período total de quatro a seis. Assim, para um ciclo normal de três refeições diárias com espaçamento aproximado de cinco horas entre elas, haveria efeito ADE em todo o período em que a pessoa estivesse acordada.

A taxa de metabolismo não depende só da atividade física e da alimentação mas também da idade, sexo e temperatura ambiente.

MCARDLE, KATCH & KATCH (1985a) afirmam que o metabolismo basal das mulheres é de 5 a 10 % menor que o dos homens devido ao fato delas possuírem mais gordura corporal do que os homens de idade e dimensões idênticas. A gordura é metabolicamente menos ativa que o músculo.

Quanto à influência da idade no metabolismo MCINTYRE (1980) mostra que o metabolismo basal decresce constantemente com a idade e que um homem de vinte anos tem um metabolismo, em média, 12 % maior que um de 45 anos com a mesmas características corporais.

Com relação ao efeito da temperatura do ar na taxa de metabolismo MCINTYRE (1980) mostra que num ambiente a 10° C, o tremor muscular pode duplicar o metabolismo de pessoas nuas em repouso. Esse autor afirma também que o calor afeta diretamente o processo metabólico

⁵ PASSMORE, R ; ROBSON, J.S. A companion to medical studies. Oxford: Blackwell, 1968. v.1.

porque aumenta a velocidade das reações químicas envolvidas. Ele cita CONSOLAZIO⁶ que encontrou um aumento de 12 % no metabolismo de atividades realizadas numa temperatura ambiente de 38° C quando comparado com o metabolismo da mesma atividade num ambiente a 29° C.

A representação de um ciclo de trabalho por uma taxa de metabolismo é uma tarefa difícil uma vez que esse ciclo é normalmente composto por diferentes atividades que expõem o homem a uma combinação de períodos de descanso e de variada solicitação física; além disso, essa taxa também depende de fatores individuais e do método utilizado na execução das tarefas.

A ISO 8996 (1990) propõe três caminhos para a obtenção da taxa de metabolismo, que diferem na exatidão dos resultados e na aplicabilidade prática.

O método apontado por essa norma como de maior exatidão é o de determinação da taxa de metabolismo através da medição do consumo de oxigênio e da produção de gás carbônico. Ele parte do princípio que a oxidação dos alimentos é a fonte de energia do corpo humano e que o organismo precisa extrair oxigênio continuamente da atmosfera já que só pode armazenar uma quantidade muito pequena desse gás.

Assim é possível calcular a taxa de metabolismo pela equação proposta por NISHI (1981):

$$M = 5,88 \cdot (0,23 \cdot RQ + 0,77) \cdot \frac{V_{O_2}}{A_{Du}} \quad (4.1)$$

onde:

M Taxa de metabolismo, W/m²;

RQ Quociente respiratório, razão entre o volume de CO₂ produzido e o volume de O₂ consumido;

V_{O₂} Oxigênio consumido em CNTP, l_{O₂}/h;

A_{Du} Área superficial do corpo de acordo com Du Bois, m².

⁶ CONSOLAZIO, C.F. ; MATHOUSH, L.R. ; NELSON, R.A. ; TORRES, J.B. ; ISAAC, G.J. Environmental temperature and energy expenditures. J. Appl. Physiol., v. 18, 1963. p. 65-68.

O método consiste em obter os volumes de oxigênio consumido e de gás carbônico produzido, a partir da análise do gás expirado pelo trabalhador num período representativo do seu ciclo de trabalho, normalmente inferior a trinta minutos.

O procedimento para coleta do ar expirado é função da solicitação física das atividades. Quando elas são leves ou moderadas a coleta é feita enquanto o trabalho é desenvolvido, começando cinco minutos após o seu início e tendo uma duração aproximada de quinze minutos. Nas tarefas pesadas, a coleta começa com o início da atividade e continua até o seu término, período usualmente não superior a cinco minutos. Após esse tempo o trabalhador senta e a coleta continua até que haja a recuperação do débito de oxigênio ocorrido durante o serviço.

Esse método exige o estudo do processo de trabalho e da frequência de repetição das atividades para posterior avaliação dos resultados. Dessa forma, a sua aplicação prática é limitada devido aos recursos técnicos necessários; além disso, as medições podem interferir com o processo de trabalho e embora existam instrumentos testados para a avaliação de campo, LOUHEVAARA et al. (1985), eles são caros.

MALCHAIRE et al. (1984) analisaram a validade das medidas de consumo de oxigênio num trabalho de campo e concluíram que embora essas medidas sejam fisicamente precisas, o curto período de tempo utilizado nas amostragens, trinta minutos, não permite que os resultados obtidos sejam usados para avaliar o verdadeiro custo fisiológico do trabalho. Eles também enfatizaram que a máscara utilizada e o dispositivo de medição carregado pelo trabalhador ($\approx 3,5$ kg) afetam a frequência cardíaca e respiratória, podendo assim influenciar nos resultados.

Outro método proposto pela ISO 8996 (1990) é o de obter o metabolismo através do registro da frequência cardíaca durante o trabalho. Esse método não é tão preciso quanto o anterior e baseia-se no fato de que existe, para cada pessoa, uma relação linear entre essa frequência e o consumo de oxigênio e portanto também entre ela e o metabolismo.

Essa relação é individual porque depende da idade, do sexo e da capacidade física, ASTRAND (1960). O procedimento padrão para consegui-la é submeter a pessoa descansada a um teste numa esteira ou bicicleta ergométrica. Esse teste normalmente é realizado em etapas de progressiva solicitação física em que a carga é mantida constante por um período de três minutos. As medições da frequência cardíaca e do consumo de oxigênio podem ser feitas continuamente ou no último minuto de cada etapa.

Estabelecida a relação é possível calcular a taxa de metabolismo de uma pessoa num determinado ciclo de trabalho a partir do consumo de oxigênio obtido do registro da frequência cardíaca.

O registro da frequência cardíaca em campo foi muito facilitado com a fabricação de instrumentos portáteis que permitem a transferência de dados à distância, NIELSEN & MEYER (1987). Isso possibilitou liberdade de movimentos ao trabalhador e praticamente nenhuma interferência na sua rotina. A principal técnica utilizada é o registro da atividade elétrica do coração colocando-se, na região cardíaca, eletrodos ligados a um pequeno emissor portátil.

ASTRAND & RODAHL (1977) relacionaram fatores que afetam a precisão desse método. Alguns desses fatores são: temperatura do ambiente, estado emocional, posição do corpo, grupo muscular exercitado, trabalho muscular estático etc.

A ISO 8996 (1990) recomenda a frequência cardíaca só para trabalho dinâmico, desenvolvido por grupos de músculos grandes com pequena solicitação estática e na ausência de sobrecarga térmica e mental.

MALCHAIRE et al. (1984) desenvolveram um trabalho de campo, com dois grupos de doze trabalhadores, para comparar as taxas de metabolismo obtidas com os métodos de consumo de oxigênio e de frequência cardíaca. O consumo de oxigênio foi medido em um período de trinta minutos e a frequência cardíaca durante oito horas.

Essa pesquisa revelou uma preferência pelos registros da frequência cardíaca realizados durante todo o período de trabalho porque permitem analisar tanto a solicitação num determinado instante como a média de todo o período trabalhado.

O terceiro caminho proposto pela ISO 8996 (1990) para o estabelecimento da taxa de metabolismo é a estimativa através de tabelas. São quatro tipos de tabelas que diferem quanto à necessidade de observação e detalhamento do trabalho e portanto em relação ao potencial de risco de erro. As duas primeiras, com elevado potencial de erro, classificam a taxa de metabolismo (baixa, moderada, alta e muito alta) pelo tipo de atividade ou pela ocupação (carpinteiro, pintor, professor, etc.). Nos outros dois tipos, que possibilitam resultados melhores que os anteriores, o trabalho é detalhado em atividades específicas (construir parede, subir escada, andar, transportar peso, etc.) ou as atividades são decompostas em termos de movimentos e esforços. Nesse último caso o metabolismo de um determinado trabalho é calculado somando-se, ao metabolismo basal, as parcelas em razão da postura do corpo, dos movimentos e dos esforços.

Os valores de taxa de metabolismo constantes nas tabelas dessa norma foram baseados numa pessoa padrão de 35 anos (homem com 70 kgf e 1,70 m e mulher com 60 kgf e 1,60 m), sendo 44 W/m² a taxa de metabolismo basal adotada para o homem e 41 W/m² para a mulher. Dessa forma, nas situações reais, é preciso considerar que a partir dos 25 anos o metabolismo decresce constantemente como explicado em MCARDLE, KATCH & KATCH (1985b) e que o peso corporal aumenta o metabolismo das atividades que exigem movimentação, MCARDLE, KATCH & KATCH (1985a).

De acordo com a ISO 8996 (1990) a taxa de metabolismo pode variar $\pm 5\%$ de pessoa para pessoa, para o mesmo trabalho e sob as mesmas condições ambientais. A experiência de campo de MALCHAIRE et al. (1984) que mediu o metabolismo de duas atividades diferentes realizadas cada qual por um grupo de trabalhadores, obteve desvio padrão de 10 % para um dos grupos e 25 % para o outro.

A obtenção da energia do metabolismo através da medição do consumo de oxigênio e da frequência cardíaca exige equipamentos adequados e tempo para os estudos necessários; esses recursos geralmente não estão disponíveis nas aplicações de campo e isso faz com que o metabolismo seja normalmente estabelecido a partir de valores referenciais tabelados.

A influência do avaliador na estimativa do metabolismo por tabelas foi demonstrada pelo trabalho de KÄHKÖNEN et al. (1992) que usaram cinco observadores experientes e cinco inexperientes para, independentemente, analisar três ciclos de trabalho de diferentes áreas. Cada ciclo foi gravado numa fita de vídeo de duas horas de duração e a estimativa foi feita, observando as fitas e enquadrando as tarefas nas cinco classes de taxa de metabolismo estabelecidas na tabela da ISO 7243 (1989).

As atividades analisadas nessa pesquisa foram da construção civil, mecânica de veículos (oficina) e comércio. Os cinco observadores experientes tinham estudado Fisiologia e há vários anos avaliavam a intensidade do trabalho; os inexperientes, embora fossem especialistas em Higiene Industrial, não tinham usado antes essa tabela e por isso foi explicado a eles como utilizá-la.

Os resultados dessa pesquisa, resumidos na tabela 4.3, mostraram, para os três ramos de atividade e tanto para observadores experientes quanto para os inexperientes, grande diferença na estimativa da taxa de metabolismo. O efeito dessas diferenças fica evidente quando se utiliza esses valores para calcular o PMV e obtém-se, para o mesmo ciclo de trabalho, resultados tão diversos como 0,63 e 2,03 para a oficina mecânica, 1,39 e 3,00 para a construção civil e - 0,23 e 1,13 para o comércio .

Tabela 4.3 Comparativo das estimativas de taxa de metabolismo e Voto Médio Estimado obtidos na pesquisa de KÄHKÖNEN et al.(1992).

Ramos de atividade	Observadores	Taxas de metabolismo (W/m ²)			Voto Médio Estimado
		Medianas	Intervalos	Diferenças	Intervalos
Oficina Mecânica	Inexperientes	192	170 - 230	60	1,02 - 2,03
	Experientes	165	147 - 185	38	0,63 - 1,27
Construção Civil	Inexperientes	240	200 - 260	60	1,39 - 2,44
	Experientes	230	211 - 292	81	1,58 - 3,00
Comércio	Inexperientes	145	120 - 170	50	0,19 - 1,04
	Experientes	135	100 - 175	75	- 0,23 - 1,13

O uso de tabelas, como a da ISO 7730 (1994) e as da ISO 8996 (1990) torna o processo suscetível a erros, tendo em vista que a escolha de valores tabelados dificulta a consideração de diferenças individuais, de equipamentos utilizados, de técnica e ritmo de trabalho. Além do mais, a subjetividade inerente ao processo faz com que as diferenças entre os observadores, relativas principalmente ao nível de treinamento, influenciem nas avaliações.

4.5 ESTIMATIVA DO ISOLAMENTO TÉRMICO DAS VESTIMENTAS

A resistência à troca de calor sensível, por convecção, radiação e condução, e a resistência à troca de calor latente, por evaporação do suor, são propriedades das vestimentas que determinam a sua interferência no conforto térmico.

A resistência imposta pelas vestimentas à troca de calor sensível do corpo pode ser expressa pelo isolamento térmico total, pelo isolamento térmico efetivo ou pelo isolamento térmico básico.

O isolamento térmico total (I_t) é o isolamento da superfície da pele até o ambiente, incluindo a resistência da camada de ar que rodeia a vestimenta e o efeito de que um corpo vestido possui área superficial maior que um corpo nú. O maior obstáculo à utilização do I_t é a grande influência da velocidade e temperatura do ar na resistência da camada de ar que rodeia a vestimenta; isso faz com que a mesma roupa tenha diferentes valores de I_t em diferentes ambientes.

$$I_t = \frac{t_s - t_o}{Q_{sk}} \quad (4.2)$$

onde:

- I_t Isolamento térmico total, ($m^2 \cdot ^\circ C/W$);
- t_s Temperatura média da pele, ($^\circ C$);
- t_o Temperatura operante, ($^\circ C$);
- Q_{sk} Perda de calor sensível por m^2 de pele, W/m^2 .

O isolamento térmico efetivo (I_{cle}) é o isolamento proporcionado só pela vestimenta e é obtido subtraindo-se do isolamento total a parcela referente à camada superficial de ar que rodeia a roupa. A desvantagem do I_{cle} é não levar em conta o fato de que um corpo vestido possui área superficial maior que um corpo nú, o que faz com que o processo de troca de calor não seja completamente representado por esse isolamento.

$$I_{cle} = \frac{t_s - t_o}{Q_{sk}} - I_a \quad (4.3)$$

onde:

- I_{cle} Isolamento térmico efetivo, ($m^2 \cdot ^\circ C/W$);
- I_a Resistência da camada superficial de ar, ($m^2 \cdot ^\circ C/W$).

O isolamento térmico intrínseco ou básico (I_{cl}) é o isolamento da pele até a superfície da vestimenta, incluindo o fator de área da vestimenta (f_{cl}), que é a relação entre a área superficial do

corpo vestido e do corpo nu. O f_{cl} é usado para considerar o efeito de que um corpo vestido possui área superficial maior que um corpo nú.

$$I_{cl} = \frac{t_s - t_o}{Q_{sk}} - \frac{I_a}{f_{cl}} \quad (4.4)$$

onde:

I_{cl} Isolamento térmico básico, ($m^2 \cdot ^\circ C/W$);
 f_{cl} Fator de área da vestimenta.

A resistência imposta pelas vestimentas à troca de calor latente do corpo com o ambiente tem sido caracterizada por três métodos principais. O primeiro estima a resistência total à evaporação (R_t) através do isolamento térmico básico (I_{cl}). A equação representativa desse método é válida para uma ou duas camadas de vestimentas permeáveis.

$$R_t = 0,06 \cdot \left[\frac{1}{h_c} + 2,22 \cdot (I_{cl} - I_a) \cdot \left(1 - \frac{1}{f_{cl}} \right) \right] \quad (4.5)$$

$$I_a = \frac{1}{(h_r + h_c)} \quad (4.6)$$

onde:

R_t Resistência total à evaporação da umidade da pele até o ambiente, isto é, incluindo a resistência da camada superficial de ar, ($m^2 \cdot kPa/W$);
 I_{cl} Isolamento térmico básico, ($m^2 \cdot ^\circ C/W$);
 I_a Resistência da camada superficial de ar, ($m^2 \cdot ^\circ C/W$);
 f_{cl} Fator de área da vestimenta;
 h_r Coeficiente de troca de calor por radiação, ($W/m^2 \cdot ^\circ C$);
 h_c Coeficiente de troca de calor por convecção, ($W/m^2 \cdot ^\circ C$).

O segundo método estima a resistência à difusão de água pelo índice de permeabilidade (i_m) e a relação de Lewis (L). A relação de Lewis relaciona os coeficientes de transferência de

calor por evaporação e convecção; para os ambientes internos ela é aproximadamente igual a 16,5 °C/kPa. O índice i_m expressa não só a influência da vestimenta, mas também, da camada de ar que a rodeia na resistência a evaporação e por isso depende da velocidade e da temperatura do ar no ambiente. O índice i_m é a razão entre a verdadeira capacidade de transferência de calor latente e de calor sensível da pele para o ambiente, comparada com a relação de Lewis.

$$R_t = \frac{I_t}{L \cdot i_m} = \frac{0,06}{i_m} \cdot \left(\frac{I_a}{f_{cl} + I_{cl}} \right) \quad (4.7)$$

onde:

- R_t Resistência total à evaporação da pele até o ambiente, isto é, incluindo a resistência da camada superficial de ar, (m².kPa/W);
- I_t Isolamento térmico total da vestimenta, (m².°C/W);
- L Relação de Lewis, $L = 16,5$ °C/kPa;
- i_m Índice de permeabilidade ao vapor d'água;
- I_a Resistência da camada superficial de ar, (m².°C/W)
- f_{cl} Fator de área da vestimenta;
- I_{cl} Isolamento térmico básico, (m².°C/W).

A norma ISO 9920 (1995) traz valores de i_m para algumas vestimentas normais de trabalho e para vestimentas de proteção. Dos valores apresentados por essa norma pode-se notar que i_m pode ser considerado igual a 0,38 para a maioria das vestimentas normais e assim a equação 4.7 pode ser simplificada:

$$R_t = 0,16 \cdot \left(\frac{I_a}{f_{cl} + I_{cl}} \right) \quad (4.8)$$

O terceiro método calcula a resistência total à evaporação (R_t) pela soma da resistência da camada de ar ($R_{e,a}$) com a resistência da camada de vestimenta ($R_{e,cl}$).

$$R_t = R_{e,a} + R_{e,cl} \quad (4.9)$$

$$R_{e,a} = \frac{0,06}{f_{cl} \cdot h_c} \quad (4.10)$$

$$R_{e,cl} = \frac{0,06 \cdot I_{cl}}{i_{cl}} \quad (4.11)$$

onde:

i_{cl} Índice de permeabilidade só da camada de vestimenta.

O índice i_{cl} refere-se só à vestimenta e é a razão entre a verdadeira capacidade de transferência de calor latente e de calor sensível através da vestimenta, comparada com a relação de Lewis. De acordo com a ISO 9920 (1995) i_{cl} pode ser considerado igual a 0,34 para a maioria das roupas constituídas de uma ou duas camadas de vestimentas permeáveis. Assim a equação 4.11 pode ser simplificada para:

$$R_{e,cl} = 0,18 \cdot I_{cl} \quad (4.12)$$

A ISO 7730 (1994), através do PMV, usa o isolamento térmico básico para diferenciar as vestimentas e portanto não leva em conta a permeabilidade do tecido à umidade. Essa permeabilidade não tem grande influência para atividades sedentárias em ambientes com temperaturas próximas à de conforto mas quando o nível de atividade e/ou a temperatura aumentam, essa propriedade é relevante devido à maior necessidade do corpo perder calor por evaporação do suor, para manter o equilíbrio térmico.

Na prática, o isolamento térmico de uma roupa é calculado pelo somatório dos isolamentos das peças que a compõem, conseguidos em tabelas como as da ISO 7730 (1994) e ISO 9920 (1995). Os valores listados nessas tabelas foram obtidos em medições realizadas em câmaras climatizadas com o uso de manequins térmicos, fixos na posição em pé. As condições dos testes não reproduzem as situações reais em que o isolamento sofre a influência de fatores como a velocidade do ar, a postura e o movimento do corpo.

A ISO 7730 (1994) cita, no seu anexo E, que a cadeira pode contribuir com um isolamento adicional de 0 clo a 0,4 clo quando são realizadas atividades sedentárias na posição sentado e remete à ISO 9920 para maiores informações. O problema é que essas informações não estão na norma citada e sim no trabalho de MCCULLOUGH et al. (1994).

Quanto à influência do movimento do corpo e da velocidade do ar, a ISO 9920 (1995) cita, no seu item 5, que o *efeito de bombeamento* causado pelo movimento do corpo pode reduzir de 5% a 50% o isolamento térmico de uma vestimenta e que a interferência do vento depende da permeabilidade do tecido e das aberturas existentes, recomendando uma redução no isolamento de 20% para taxas de metabolismo superiores a 100 W/m² e de 10% para valores entre 60 W/m² e 100 W/m².

As normas tratam dessas interferências superficialmente, dificultando a sua consideração nas aplicações práticas.

Um outro aspecto a ser abordado é o de que no Brasil não se conhece trabalhos sobre isolamento térmico das vestimentas e assim não se dispõe de parâmetros que permitam comparar as roupas utilizadas aqui com aquelas estudadas por OLESEN (1985) e que formam a base das tabelas da ISO 9920 (1995).

A dificuldade de enquadrar as peças de uma vestimenta naquelas listadas nas tabelas também é uma fonte de erros considerável. Isso foi comprovado pelo trabalho de MCCULLOUGH et al. (1985) que usando estudantes da área têxtil para estimar o isolamento térmico de algumas roupas previamente analisadas em laboratório, obteve diferenças entre o estimado e o real que resultaram num coeficiente de variação de 23%. Essa variação é alta se for considerado que os avaliadores eram da área têxtil e foram treinados para o uso das tabelas e que as peças de vestuário usadas foram idênticas às listadas nas tabelas.

A importância da correta estimativa do isolamento térmico das vestimentas na avaliação do conforto térmico pode ser verificada pelo fato de que um aumento de 0,1 clo no isolamento corresponde, para as atividades sedentárias, a uma diminuição de 0,6°C na temperatura de conforto e para as atividades pesadas, uma diminuição de 1,5°C (FANGER, 1970).

5 CONCLUSÕES

O estabelecimento da taxa de metabolismo de um ciclo de trabalho em campo é uma tarefa difícil e a exatidão dos resultados depende dos recursos técnicos disponíveis. Esses recursos englobam não só o uso de instrumentos e métodos apropriados mas também de observadores treinados, já que todos os métodos tem limitações.

O método do consumo de oxigênio, embora seja considerado o mais exato, utiliza um curto período de tempo nas amostragens, o que pode significar que o verdadeiro custo fisiológico do trabalho não é avaliado. Além disso, a máscara utilizada e o dispositivo de medição carregado pelo trabalhador ($\approx 3,5$ kg), podem influenciar nos resultados.

O uso da frequência cardíaca para a estimativa do metabolismo foi muito facilitado com o surgimento dos instrumentos telemétricos que possibilitam liberdade de movimentos ao trabalhador e praticamente nenhuma interferência na sua rotina. Isso viabilizou o registro de dados de todo o período de trabalho, permitindo a análise tanto da solicitação num determinado instante quanto da média do período trabalhado. Esse método, no entanto, só é recomendado para trabalho dinâmico, desenvolvido por grupos de músculos grandes com pequena solicitação estática e na ausência de sobrecarga térmica e mental.

Os recursos exigidos pelos métodos anteriores fazem com que a estimativa da taxa de metabolismo nos trabalhos de campo seja normalmente realizada através de tabelas como as da ISO 7730 (1994) e ISO 8996 (1990). O uso dessas tabelas sujeita o processo a erros consideráveis, tendo em vista que a escolha de valores tabelados dificulta a consideração de

diferenças individuais, de equipamentos utilizados, de técnica e ritmo de trabalho. Além do mais, a subjetividade inerente a esse procedimento faz com que as diferenças entre os observadores influenciem nas avaliações.

A imprecisão na estimativa do metabolismo através de tabelas poderia ser minimizada se as normas trouxessem informações ou referências sobre as condições em que os valores tabelados foram obtidos. Uma outra ação indispensável é o treinamento dos observadores para o uso correto das tabelas e sobre os fatores que influenciam na taxa de metabolismo e como contabilizar essa influência.

A ISO 7730 (1994), através do PMV, usa só o isolamento térmico básico para diferenciar as vestimentas e assim não leva em conta a permeabilidade do tecido à umidade. Essa permeabilidade não tem grande influência na sensação térmica das pessoas se a atividade é sedentária e a temperatura do ambiente está próxima à de conforto. Quando o nível de atividade e/ou a temperatura aumentam, essa propriedade é relevante devido à maior necessidade do corpo perder calor por evaporação do suor.

A correta estimativa do isolamento térmico das vestimentas através dos valores tabelados nas normas ISO 7730 (1994) e ISO 9920 (1995) é difícil porque essas normas não contém informações precisas sobre a influência nesse isolamento de fatores como a velocidade do ar, a postura e o movimento do corpo. Uma outra fonte de erros é a subjetividade de enquadrar as peças de uma vestimenta naquelas listadas nas tabelas. No Brasil existe o agravante de não se dispor de trabalhos sobre isolamento térmico das vestimentas e assim não se conta com parâmetros que permitam comparar as roupas utilizadas aqui com aquelas listadas nas tabelas da ISO 9920 (1995).

Para possibilitar maior exatidão na estimativa do isolamento térmico das vestimentas através de tabelas, é necessário que as normas sobre o assunto contenham informações mais detalhadas sobre a influência dos fatores citados anteriormente, permitindo, assim, a sua correta contabilização. O treinamento dos avaliadores é fundamental para o enquadramento das

vestimentas nos itens listados nas tabelas e para a consideração das condições peculiares ao uso de cada vestimenta.

Devido à subjetividade do processo de determinação da taxa de metabolismo e do isolamento térmico das vestimentas por tabelas, a estimativa média, obtida de vários observadores treinados, pode ser mais representativa da realidade que a individual.

O efeito combinado de erros nas estimativas da taxa de metabolismo e no isolamento térmico das vestimentas pode resultar numa avaliação de conforto térmico irreal, tendo em vista a grande influência dessas variáveis no PMV.

6 SUGESTÃO DE NOVOS TRABALHOS

No desenvolvimento dessa dissertação, identificamos que o tema "Avaliação de conforto térmico" é um campo muito pouco explorado pelos pesquisadores brasileiros e assim existe uma grande carência de informações. Entre os vários trabalhos que poderiam ser propostos existem, no entanto, dois que se destacam pela sua imediata aplicabilidade. O primeiro seria o estudo do isolamento térmico e da permeabilidade ao vapor d'água das roupas brasileiras, em especial aquelas usadas nos ambientes de trabalho. A pesquisa poderia não só efetuar o levantamento dessas características mas também avaliar a influência da velocidade do ar, da postura e movimento do corpo nessas propriedades. Um segundo trabalho seria o desenvolvimento de um software que permita prever a sensação térmica de um grupo de pessoas quando expostas a uma determinada combinação das variáveis ambientais e pessoais de conforto. Esse software deve ser uma ferramenta prática que disponha de informações suficientes para possibilitar, mesmo para aqueles que não possuem profundos conhecimentos sobre o conforto térmico, a sua avaliação com um grau aceitável de precisão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1.AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **Handbook of Fundamentals**. Atlanta, 1997a. 1v. cap. 8 : Physiological Principles for Comfort and Health . p. 8.1 - 8.32 .
- 2.---- , ---- , ---- . 1997b. 1v. cap. 13: Measurement and Instruments . p. 13.1 - 13.25 .
- 3.----, Atlanta. **ASHRAE 55**; thermal environmental conditions for human occupancy. 1974.
- 4.---- , Atlanta. **ASHRAE 55**; thermal environmental conditions for human occupancy. 1981.
- 5.---- , Atlanta. **ASHRAE 55**; thermal environmental conditions for human occupancy. 1992.
- 6.ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. **NBR 6401**; instalações centrais de ar condicionado para conforto - parâmetros básicos de projeto. Rio de Janeiro, 1980. 21p.
- 7.ASTRAND, I. Aerobic work capacity in men and women with special reference to age. **Acta Physiologica Scandinavica**, 49, supp. 169, 1960.
- 8.ASTRAND, I ; RODAHL, K. **Textbook of work physiology: Physiological bases of exercise**. New York: McGraw-Hill, 1977.
- 9.BEYER, P. ; SALVADORETTI, J.L. Avaliação do conforto térmico ambiental. In: **MERCOFRIO 98 - FEIRA E CONGRESSO DE AR CONDICIONADO, REFRIGERAÇÃO, AQUECIMENTO E VENTILAÇÃO DO MERCOSUL**, 1998, Porto Alegre - RS. **Anais...** Porto Alegre: Paulo Beyer, 1998.

10. BRAGER, G.S. Using laboratory-based models to predict comfort in office buildings. **ASHRAE Journal**, v.34, n.4, p. 46-49, April 1992.
11. BUSCH, J.F. A tale of two populations: thermal comfort in air-conditioned and naturally ventilated offices in Thailand. **Energy and Buildings**, 18, p. 235-249, 1992.
12. CHUNG, T.M. , TONG, W.C. Thermal comfort study of young Chinese people in Hong Kong. **Building and Environment**, v. 25. n. 4, p. 317-328, 1990.
13. DE DEAR, R.J. ; AULICIEMS, A. Validation of the Predicted Mean Vote model of thermal comfort in six Australian field studies. In: **ASHRAE Transactions**, v.91(2B), 1985.
14. DE DEAR, R.J ; LEOW, K.G. ; AMEEN, A. Thermal comfort in the humid tropics- Part 1: Climate chamber experiments on thermal acceptability in Singapore. In: **ASHRAE Transactions**, v. 97, I, 1991.
15. DE DEAR, R.J.; FOUNTAIN, M.E. Field experiments on occupant comfort and office thermal environments in a hot-humid climate. In: **ASHRAE Transactions**, v. 100, II, 1994.
16. FANGER, O. **Thermal Comfort - Analysis and Application in Environmental Engineering**. Copenhagen, 1970. 244p.
17. ---- . Calculation of Thermal Comfort - Introduction of a basic Comfort Equation. In: **ASHRAE Transactions**, v. 73, II, 1967. 20p.
18. FROTA, A.B. ; SCHIFFER, S.R. **Manual de Conforto Térmico**. 2. ed. São Paulo: Studio Nobel, 1995. 243p.
19. GAGGE, A.P. ; STOLWIJK, J.A.J. ; NISHI, Y. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. In: **ASHRAE Transactions**, v. 77, part. 1, 1971.
20. ----. ; NISHI, Y ; GONZALEZ, R.R. Standard effective temperature - A single index of temperature sensation and thermal discomfort. In: **THERMAL COMFORT AND MODERATE HEAT STRESS**, 1972, Watford. **Proceedings...** Watford: Building Research Establishment Report #2, September, 1972.

21. GUIMARÃES, F.A. ; NEFUSSI, N. Engenharia de ventilação industrial. In: FUNDACENTRO. **Curso de Engenharia do Trabalho** . São Paulo, Fundacentro, 1979. 6v. V. 4: 829-843.
22. HOUGHTEN, F.C. ; YAGLOU, C.P. Determining lines the equal comfort , and Determination of the comfort zone. In: **ASHVE Transactions**, v. 29 , 1923.
- 23.----.----. Cooling effect on human beings produced by various air velocities. In: **ASHVE Transactions**, v. 30 , 1924.
24. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Geneva. **ISO 7730**; moderate thermal environments-determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. Geneva, 1984.
25. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Switzerland. **ISO 7726**; thermal environments-instruments and methods for measuring physical quantities. Switzerland, 1985. 39p.
26. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Switzerland. **ISO 7243**; hot environments-estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT- index (wet bulb globe temperature). 1989. 9p.
27. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Geneva. **ISO 8996**; ergonomics-determination of metabolic heat production. Geneva, 1990.
28. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Geneva. **ISO 7730**; moderate thermal environments-determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. Geneva, 1994.
29. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Geneva. **ISO 9920**; ergonomics-estimation of the thermal insulation and evaporative resistance of a clothing ensemble. Geneva, 1995.
30. JABARDO, J. M. S. Conforto Térmico. **Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo**. São Paulo, 1984. 22p.
31. JAMY, G.N. Towards new indoor comfort temperatures for Pakistani buildings. In: NICOL, F. et. al. **Standards for thermal comfort - Indoor air temperature standards for the 21st century**. London, 1995. p.14-27.

32. JONES, B.W. ; HSIEH, K. ; HASHINAGA, M. The effect of air velocity on thermal comfort at moderate activity levels. In: **ASHRAE Transactions**, v. 92, part. 2B, 1986.
33. KÄHKÖNEN, E. ; NYKYRI, E. ; ILMARINEN, R. ; KETOLA, R. ; LUSA, S. ; NYGARD, C-H. ; SUURNÄKKI, T. The effect of appraisers in estimating metabolic rate with the Edholm scale. In **Applied Ergonomics**, v.23, n.3, 1992.
34. KARYONO, T.H. Thermal comfort for the Indonesian workers in Jakarta. **Building Research and Information**, v. 23, n. 6, 1995.
35. KOCH, W. ; JENNINGS, B.H. ; HUMPHREYS, C.M. Environmental study II - Sensation responses to temperature and humidity under still air conditions in the comfort range . In: **ASHRAE Transactions**, v. 66, 1960, p. 264.
36. LOUHEVAARA, B. ; ILMARINEN, J. ; OJA, P. Comparison of three field methods for measuring oxygen consumption. **Ergonomics**, v. 28, n. 2, 1985, p. 463-470.
-
37. MACINTYRE, A.J. **Ventilação Industrial e Controle da Poluição**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1990. Cap. 3: Efeito do movimento do ar sobre o conforto de uma pessoa. p.26-36.
38. MALCHAIRE, J. ; WALLEMACQ, M. ; ROGOWSKY, M. ; VANDERPUTTEN. Validity of oxygen consumption measurement at the workplace: What are we measuring. In: **Annals of Occupational Hygiene**, v. 28, n. 2, 1984. p. 189-193.
39. MCARDLE, W. D. ; KATCH, F. I. ; KATCH, V. L. **Fisiologia do exercício - Energia, Nutrição e desempenho humano**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1985a. Cap. 9: Consumo de energia humana durante o repouso e a atividade física. p. 96-107.
40. MCARDLE, W. D. ; KATCH, F. I. ; KATCH, V. L. **Fisiologia do exercício - Energia, Nutrição e desempenho humano**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1985b. Cap. 11: Diferenças individuais e mensurações das capacidades energéticas. p. 122-139.
41. MCCULLOUGH, E.A. ; JONES, B.W. ; HUCK, J. A comprehensive data base for estimating clothing insulation. In: **ASHRAE Transactions**, v. 91, part. 2A, 1985.
42. MCCULLOUGH, E.A. ; OLESEN B.W. ; HONG, S. Thermal insulation provided by chairs. In: **ASHRAE Transactions**, v. 100, I, 1994, p. 795-802.
43. MCINTYRE, D.A. **Indoor Climate**. London: Applied Science Publishers, 1980. 443p.

- 44.MCNALL, P.E. ; JAAX, J. ; ROHLES, F.H. ; NEVINS, R. G. ; SPRINGER, W. Thermal comfort (Thermally neutral) conditions for three levels of activity . In: **ASHRAE Transactions**, v. 73, 1967.
- 45.MESQUITA,A.L.S. ; GUIMARÃES, F.A. ; NEFUSSI, N. **Engenharia de Ventilação Industrial**. São Paulo, CETESB/ASCETESB, 1985. 442p.
- 46.MODERA, M.P. Skin temperature and evaporative heat loss variations for men and women in thermal comfort . In: **ASHRAE Transactions**, v. 99, II, 1993.
- 47.NEVINS, R.G. Criteria for thermal comfort. **Building Research**, p. 27-30, Jul-Aug. 1966.
- 48.NIELSEN, R. ; MEYER, J. P. Evaluation of metabolism from heart rate in industrial work. **Ergonomics**, v. 30, n. 3, 1987. p. 563-572.
- 49.NISHI, Y. Measurement of thermal balance of man. **Bioengineering Thermal Physiology and Comfort**. New York, eds. Elsevier, 1981.
- 50.OLESEN, B.W. A new simpler method for estimating the thermal insulation of a clothing ensemble. In: **ASHRAE Transactions**, v. 91, part. 2B, 1985.
- 51.OLESEN, B.W. Standards for design and evaluation of the indoor thermal environment. **ASHRAE Journal**, p. 20-25, Aug. 1993.
- 52.OSELAND, A.N. Predicted and reported thermal sensation in climate chambers, offices and homes, **Energy and Buildings**, 23, p. 105-115, 1995.
- 53.RIBEIRO, B.A. Contribuição ao estudo do conforto térmico. **Boletim nº 86, Instituto de Higiene de São Paulo**, 1945.
- 54.ROHLES, F.H. ; NEVINS, R.G. ; SPRINGER, W ; FEYERHERM, A.M. Temperature - Humidity chart for thermal comfort of seated persons. In: **ASHRAE Transactions**, v. 72, part. I, 1966, p. 283.
- 55.---- . **Thermal sensation of sedentary man in moderate temperature**. Institute for Environmental Research, Special Report. Kansas State University, 1970.
- 56.---- ; ----. The nature of thermal comfort for sedentary man. In: **ASHRAE Transactions**, v. 77, part. I, 1971, p. 239.

- 57.---- .Psychological aspects of thermal comfort. **ASHRAE Journal**, p. 86-90, Jan. 1971.
- 58.---- ; HAYTER, R.B. ; MILLIKEN, G. Effective temperature (TE*) as a predictor of thermal comfort. In: **ASHRAE Transactions**, v. 81, part. II, 1975, p. 148.
- 59.ROWE, D.M. Warm and sweaty: thermal comfort in two naturally ventilated offices in Sydney. In: NICOL, F. et. al. **Standards for thermal comfort - Indoor air temperature standards for the 21st century**. London, 1995. p. 234-241.
- 60.---- ; LAMBERT, S.G. ; WILKE, S.E. Pale green, simple and user friendly: occupant perceptions of thermal comfort in office buildings. In: NICOL, F. et. al. **Standards for thermal comfort - Indoor air temperature standards for the 21st century**. London, 1995. p. 59-69.
- 61.ROWLEY, F.B. ; JORDAN, R.C. ; SNYDER, W.E. Comfort reactions of workers during occupancy of air conditioned offices. **ASHVE Transactions**, 53, 1947.
-
- 62.RUAS, A.C. ; LABAKI, L.C. Cuidados na aplicação prática da ISO 7730. In: MERCOFRIO 98 - FEIRA E CONGRESSO DE AR CONDICIONADO, REFRIGERAÇÃO, AQUECIMENTO E VENTILAÇÃO DO MERCOSUL, 1998, Porto Alegre-RS. **Anais...** Porto Alegre: Paulo Beyer, 1998.
- 63.SÁ, P. Estudos para o estabelecimento de uma escala de temperaturas efetivas no Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia**, 27, n.3, p. 67-69, 1934.
- 64.SÁ, P. Estudos sobre o conforto térmico e o conforto visual no Brasil. **Boletim do Ministério do Trabalho, Indústria e Comércio**, Instituto Nacional de Tecnologia, Rio de Janeiro, 1936.
- 65.SCHILLER, G.E. ; ARENS,E.A. ; BAUMAN, F.S.; BENTON, C. ; FOUNTAIN, M. ; DOHERTY, T. A field study of thermal environments and comfort in office buildings. In: **ASHRAE Transactions**, v. 94, part. II, 1988.
- 66.SCHILLER, G.E. A comparison of measured and predicted comfort in office buildings. In: **ASHRAE Transactions**, v. 96, part. I, 1990.
- 67.SPITZER, J. ; HETTINGER, T. ; KAMINSKY, G. **Tafeln für Energieumsatz bei körperlicher Arbeit** . Beuth Verlag GmbH, Berlin-Köln, 1982.

- 68.TANABE, S. ; KIMURA, K. ; HARA, T. Thermal comfort requirements during the summer season in Japan. In: **ASHRAE Transactions**, v. 93, part. I, 1987.
- 69.TANABE, S. ; KIMURA, K. Effects of air temperature, humidity, and air movement on thermal comfort under hot and humid conditions. In: **ASHRAE Transactions**, v. 100, part. II, 1994.
- 70.VERNON, H.M. ; WARNER, C.G. The influence of the humidity of the air on capacity for work at high temperatures. *J. Hyg. Camb.*,v. 32, p. 431-462, 1932.
- 71.WYON, D. ; et. al. The mental performance of subjects clothed for comfort of two different air temperatures. **Ergonomics**, 18, 4, 1975.
- 72.XAVIER, A.A.P. ; LAMBERTS, R. Temperatura interna de conforto e percentagem de insatisfeitos para atividade escolar: Diferenças entre a teoria e a prática. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4, 1997, Salvador - Ba. **Anais...** Salvador: Jussara M.F.G. Nery, Tereza M.M. Freire e Roberto Lamberts, 1997. p. 198-204.
- 73.YAGLOU, C.P. ; MILLER, W.E. Effective temperature with clothing. In: **ASHVE Transactions**, 31: 89 - 99, 1925.
- 74.YAGLOU, C.P. ; DRINKER, P. The summer comfort zone. In: **ASHVE Transactions**, 35, 1929.
- 75.YAGLOU, C.P. A method for improving the effective temperature index. In: **ASHVE Transactions**, 53, 1947.

ABSTRACT

In Brazil, a country with a predominantly hot and humid climate, there is a lack bibliographical material on subject of thermal comfort evaluation available. On the other hand exist a world wide search for information to enable the construction of comfortable and energetically economic buildings.

This work explains the method established in the ISO 7730 (1994) for evaluating thermal comfort and makes a brief report about its normative references. The practical application of the norms is also theoretically analyzed, discussing the errors in the estimation of metabolic rate and thermal insulation of clothing and its influence on the thermal comfort evaluation.

This research concludes that, because of the great influence of metabolic rate and thermal insulation of clothing, the use of tables for the overall estimate of thermal comfort can lead to considerable errors that may result in an unreal forecast of the thermal sensation. Those errors are due to the fact that the choice of listed values does not consider individual differences, equipments used, rhythm and type of work to be analysed. The inherent subjectivity of the process influences evaluations, due mainly to training level differences of observers.