XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído
JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

ANÁLISE DE INCERTEZAS DE PARÂMETROS AMBIENTAIS PARA CONFORTO TÉRMICO HUMANO

Eliane H. Suzuki (1); Brenda C. C. Leite (2); Racine T. A. Prado (3)
(1) Arquiteta, doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, eliane.suzuki@usp.br. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos. Av. Prof. Mello Moraes, 2231, Cidade Universitária, São Paulo-SP, 05508-030, (11) 3091-9671.
(2) PhD, Professora do Departamento de Engenharia de Construção Civil, bccleite@usp.br. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Av. Prof. Almeida Prado, trav.2, n 83, Cidade Universitária, São Paulo-SP, 05508-070.
(3) PhD, Professor do Departamento de Engenharia Mecânica de Energia e Fluidos, racine.prado@usp.br. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.

RESUMO
A avaliação de ambientes para conforto térmico humano é parametrizada por normas nacionais e internacionais, a partir do estudo de Fanger. A equação de balanço térmico, adaptada para o cálculo do PMV (*Predicted Mean Vote* - Voto médio estimado) é uma função com seis parâmetros principais, sendo dois pessoais e quatro ambientais. Tais parâmetros ambientais podem ser obtidos a partir de medições, por instrumentação adequada, de acordo com os critérios da norma ISO 7726. Como há vários parâmetros a serem avaliados de forma simultânea, faz-se necessário considerar a incerteza combinada, para determinar a influência de cada parâmetro no valor final de PMV. O resultado de incerteza de ± 0,13 evidencia que os critérios da norma ISO 7730 para PMV estão muito rigorosos para avaliação de ambientes térmicos, pois a variação de PMV em torno da neutralidade para a categoria A tem valor próximo à incerteza padrão combinada, por isso, o PMV não deveria ser considerado de forma isolada para classificação do ambiente térmico.
Palavras-chave: conforto térmico, PMV, análise de incerteza.

ABSTRACT
The evaluation of environmental conditions for thermal comfort is parameterized by national and international standards, based on the Fanger study. The thermal balance equation, adapted for the calculation of the PMV (Predicted Mean Vote) is a function with six main parameters, being two personal and four environmental. Such environmental parameters can be obtained from measurements, by appropriate instrumentation, according to ISO 7726 criteria. Since there are several parameters to be evaluated simultaneously, it is necessary to consider the combined uncertainty to determine the influence of each parameter on the final value of PMV. The uncertainty of ± 0.13 shows that the ISO 7730 criteria for PMV are very strict for the evaluation of thermal environments, since the PMV variation around neutrality for category A has a value close to the combined standard uncertainty. For this, PMV should not be the only parameter considered to classify the thermal environment.
Keywords: thermal comfort, PMV, uncertainty analysis.

1. INTRODUÇÃO

Conforto térmico é a condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico (ASHRAE 55, 2013).

Como a definição de conforto em geral varia muito, pois abrange tanto a percepção individual no ambiente (quente/frio, úmido/seco, ruidoso/ silencioso, claro/escuro) como a intensidade desta sensação (por exemplo, muito quente ou muito frio), de acordo com Rohles et al. apud ASHRAE (2009), a aceitabilidade pode representar um conceito mais útil de avaliar a resposta do usuário, pois permite uma progressão em direção a um objetivo concreto. A aceitabilidade implicou na criação de normas sobre conforto térmico, que estabelecem intervalos da faixa de conforto considerando as variáveis que influenciam a satisfação térmica dos usuários de um ambiente, assim como sobre a instrumentação adequada para avaliação de ambientes térmicos.

1.1 Normas para conforto térmico

Entre as normas internacionais para conforto térmico, são citadas três, ASHRAE 55(2013), ISO 7730 (2005) e ISO 7726 (1998).

A ASHRAE 55 (2013) apresenta um item de avaliação do ambiente térmico, com especificações de instrumentação de acordo com a ISO 7726 (1998), posições (localização e altura), período e condições climáticas para medição, condições de operação dos equipamentos de ar condicionado, tipos de avaliação e métodos de validação. Descreve dois tipos de avaliação: o primeiro determina estatisticamente a satisfação dos usuários do edifício por meio dos resultados de entrevistas, e o segundo estabelece as condições de conforto por meio da análise das variáveis ambientais, verificando se estão de acordo com a própria ASHRAE 55 (2013).

A ISO 7730 (2005) não propõe método de medição, apresentando cinco métodos de avaliação, com procedimentos tanto para simulação quanto para medição em edifícios reais. O método "A" propõe calcular o número ou porcentagem de horas que o PMV e a temperatura operativa estiverem fora do intervalo especificado, no período em que o edifício estiver ocupado. No método "B", calcula-se o tempo que a temperatura operativa excede o intervalo especificado durante o período ocupado, ponderado por um fator que é função da quantidade de graus que o intervalo é excedido. O método "C" é semelhante ao "B", mas em vez de utilizar a temperatura operativa, usa-se o PMV em função do PPD (*Predicted percentage dissatisfied* – porcentagem estimada de insatisfeitos). O método "D" calcula a média de PPD durante as horas ocupadas e o "E" soma o PPD durante as horas ocupadas.

A ISO 7726 (1998) já é específica para instrumentação e medição de quantidades físicas em ambientes térmicos. Detalha os parâmetros que devem ser medidos e como devem ser medidos, tipos de instrumentos e respectivos intervalos de operação, normatizando o processo de registro de medição que leva a determinação dos índices de conforto. A ISO 7726 (1998) estabelece como quantidades físicas básicas a temperatura do ar, temperatura radiante média, umidade absoluta, velocidade do ar e temperatura da superfície. Para cada variável são descritos os sensores ideais e os cuidados que devem ser tomados, e estabelece que em ambientes térmicos homogêneos deve ser feita a medição em apenas uma altura, no nível do abdômen (a 0,6 m para pessoas sentadas e 1,1 m para pessoas em pé). Já em ambientes não homogêneos, parâmetros como velocidade do ar e temperatura, que podem causar desconforto em determinadas alturas, devem ser medidos em três patamares (níveis dos tornozelos, abdômen e cabeça): para pessoas sentadas, 0,1 m, 0,6 m e 1,1 m respectivamente, enquanto que para pessoas em pé, as alturas devem ser 0,1 m, 1,1 m e 1,7 m respectivamente.

1.2 Parâmetros ambientais para avaliação do conforto térmico

Fanger (1972) estabeleceu um índice chamado PMV (*Predicted Mean Vote* – voto médio estimado), que prevê a sensação térmica de um grupo grande de pessoas em um mesmo ambiente térmico por meio de uma escala psicofísica de sete pontos. Segundo Fanger (1972), as variáveis mais importantes que influenciam a condição de conforto térmico são: temperatura do ar, pressão de vapor de água no ar ambiente, velocidade relativa do ar e temperatura radiante média – caracterizando as variáveis ambientais – e também nível de atividade (metabolismo) e resistência térmica da roupa, que são as variáveis pessoais. Com o PMV é possível determinar a sensação térmica para qualquer combinação destas variáveis. A escala varia de -3 a 3, sendo que o valor "0" indica neutralidade (confortável):

-3 muito frio
-2 frio

-1	levemente frio
0	neutro
+1	levemente quente
+2	quente
+3	muito quente

O conforto térmico pode ser obtido por diferentes combinações das variáveis ambientais, sendo quase impossível considerar o efeito de qualquer um dos fatores físicos independentemente. A partir destas informações e também a partir de experimentos com estudantes em câmara climatizada, pôde-se inferir que a temperatura média da pele e a secreção de suor em um dado nível de atividade, combinados com o balanço de calor do corpo humano, formam a base para a equação geral de conforto, assumindo que o corpo está no estado de equilíbrio térmico com acumulação de energia desprezível.

A equação geral de conforto (Equação 1), que resulta no PMV, está demonstrada a seguir:

$$PMV = [0{,}303 \cdot exp(-0{,}036 \cdot M) + 0{,}028] \cdot \{(M - W) - 3{,}05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6{,}99 \cdot (M - W) - p_a] - 0{,}42 \cdot [(M - W) - 58{,}15] - 1{,}7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0{,}0014 \cdot M(34 - T_a) - 3{,}96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(T_{cl} + 273)^4 - (\bar{T}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (T_{cl} - T_a)\} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:
$M =$ taxa metabólica [W/m^2];
$W =$ trabalho [W/m^2];
$f_{cl} =$ fator de área da vestimenta [adimensional];
$T_a =$ temperatura do ar [°C];
$\bar{T}_r =$ temperatura radiante média [°C];
$p_a =$ pressão parcial de vapor d'água [Pa];
$T_{cl} =$ temperatura da superfície da vestimenta [°C].

A temperatura de superfície da vestimenta é determinada em função da atividade, isolamento da roupa, fator de área da vestimenta, temperatura radiante média e temperatura do ar, além do coeficiente de transferência de calor por convecção.

As variáveis de temperatura da superfície da vestimenta (T_{cl}), coeficiente de convecção (h_c) e fator de área de vestimenta (f_{cl}) podem ser deduzidas a partir das equações 2 a 6 a seguir:

$$T_{cl} = 35{,}7 - 0{,}028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot \{3{,}96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(T_{cl} + 273)^4 - (\bar{T}_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (T_{cl} - T_a)\} \quad \text{Equação 2}$$

$$h_c = 2{,}38 \cdot |T_{cl} - T_a|^{0{,}25} \text{ para } 2{,}38 \cdot |T_{cl} - T_a|^{0{,}25} > 12{,}1 \cdot \sqrt{v_a} \quad \text{Equação 3}$$

$$h_c = 12{,}1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \text{ para } 2{,}38 \cdot |T_{cl} - T_a|^{0{,}25} < 12{,}1 \cdot \sqrt{v_a} \quad \text{Equação 4}$$

$$f_{cl} = 1{,}00 + 1{,}290 I_{cl} \text{ para } I_{cl} \leq 0{,}078\, m^2 \cdot K/W \quad \text{Equação 5}$$

$$f_{cl} = 1{,}05 + 0{,}645 I_{cl} \text{ para } I_{cl} > 0{,}078\, m^2 \cdot K/W \quad \text{Equação 6}$$

Onde:
I_{cl} = Isolamento da roupa [m^2.K/W];
h_c = Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/(m^2.K)];
v_a = Velocidade relativa do ar [m/s].

1.3 Instrumentação

Os princípios de medição dos instrumentos utilizados para avaliação de conforto térmico estão brevemente descritos nos próximos parágrafos.

Para temperatura de bulbo seco, o termômetro de resistência elétrica, ou RTD (*Resistance Temperature Detector*) é o tipo mais utilizado para a avaliação de conforto térmico em ambientes moderados; é considerado estável, resistente à corrosão e capaz de medir maior faixa de temperatura se comparado a outros componentes. Destes, o mais usado é feito com uma resistência de 100 Ω a 0°C (Pt100)

(ASHRAE, 2009). É o tipo que apresenta melhor exatidão de medição quando devidamente calibrado e possui uma resposta transiente razoável (HOLMAN, 1994).

O termômetro de globo negro consiste em um sensor de temperatura que é colocado dentro de um globo negro, geralmente com diâmetro de 150 mm. É usado para obter um valor aproximado da temperatura radiante média, a partir dos valores simultâneos de temperatura de globo (T_g), temperatura ambiente (T_a) e velocidade do ar (v_a) em volta do globo (ASHRAE, 2009). Quanto à especificação do sensor de temperatura, pode ser utilizado o mesmo tipo para medição de temperatura do ar. Usualmente, são utilizados termômetros de resistência de platina e por isso apresentam a mesma faixa de exatidão, porém o intervalo de temperatura pode variar, por causa do globo negro.

Para umidade relativa, são utilizados transdutores elétricos. O elemento resistivo é constituído de duas camadas de metal nobre em uma forma de plástico, com um espaço finito entre elas. Quando as camadas são cobertas com solução de cloreto de lítio, forma-se um caminho condutor entre elas. A resistência elétrica deste caminho varia com a umidade relativa do ar do entorno e assim, pode ser utilizado como um elemento sensor. A relação entre resistência e umidade relativa não é linear, e geralmente um único transdutor consegue cobrir apenas um intervalo pequeno, da ordem de 10% da UR. Quando são necessários grandes intervalos, são utilizados de sete a oito transdutores combinados em um único sistema, cada um projetado para uma parte específica do intervalo total. Um único elemento sensor pode ter uma incerteza da ordem de 1,5% de umidade relativa, resolução de 0,15%, constante de tempo inferior a 3 s. Como essas unidades são sensíveis à temperatura, deve ser realizada uma forma de compensação da temperatura. As possíveis temperaturas de trabalho são de -40ºF a 150ºF (DOEBELIN, 1983).

Para velocidade do ar, os dispositivos mais conhecidos são os anemômetros de fio quente ou filme quente. O anemômetro de fio quente consiste em um fio fino, apoiado em duas hastes, sendo que uma corrente elétrica esquenta o fio a uma temperatura acima da temperatura do fluido. Normalmente, o fio possui de 4 a 10 μm de diâmetro e 1 mm de comprimento e é de platina ou tungstênio (BECKWITH; MARANGONI; LIENHARD, 1995), ou de platina-irídio (80% platina e 20% irídio). Estes elementos possibilitam que os fios sejam finos e possuam altos coeficientes de temperatura, resistividade e resistência à tração, e baixa condutividade térmica, para reduzir as perdas de calor por condução pelos suportes. (GOLDSTEIN, 1996)

1.4 Incerteza de medição

Além da especificação correta dos instrumentos de medição, considerando as características inerentes ao princípio de medição, deve ser realizada a análise de incerteza, que deve ser universal, sendo sua grandeza real internamente consistente e transferível. A incerteza de medição, segundo GUM (2008), refere-se à dúvida acerca da validade do resultado de uma medição.

Ainda segundo GUM (2008), há diversas fontes possíveis de incerteza de medição, tais como amostragem não representativa, definição incompleta do mensurando e resolução finita do instrumento.

Para modelar a medição, normalmente o mensurando não é medido diretamente, mas é determinado a partir de outras grandezas, a partir de uma função. O conjunto de grandezas de entrada pode ser categorizado por grandezas cujos valores e incertezas podem ser diretamente determinados na medição, ou por aquelas cujos valores e incertezas são incorporados a medições a partir de fontes externas. Para isto, são divididos em dois tipos de classificação, Tipo A e Tipo B.

A avaliação Tipo A de incerteza é o método na qual é utilizada análise estatística de séries de observações e a avaliação Tipo B de incerteza é o método que utiliza outros meios que não a análise estatística de séries de observações, com base em eventos que tem a probabilidade de ocorrer com certo grau de credibilidade.

2. OBJETIVO

O objetivo deste estudo é realizar a análise de incerteza da equação geral de conforto térmico, a partir das variáveis de temperatura de bulbo seco, temperatura radiante média, umidade relativa e velocidade do ar, para fins de avaliação de conforto térmico humano para ambientes moderados, em edifício de escritórios.

3. MÉTODO

O método contém a descrição dos instrumentos de medição para conforto térmico utilizados em pesquisas recentes (FORGIARINI RUPP; GHISI, 2017; DE VECCHI et al., 2017; JUNGHANS; WIDERIN, 2017;

STAZI et al., 2017; TAKASU et al., 2017) conforme resumo descrito na Tabela 1, os dados utilizados para a análise de incertezas e os detalhes dos cálculos tipo A e tipo B.

3.1 Instrumentação para conforto térmico

Na Tabela 1 estão descritos os instrumentos utilizados nas pesquisas recentes que tiveram como escopo a avaliação de conforto térmico humano em ambientes moderados. Para cada parâmetro da grandeza medida, estão especificadas as referências, o intervalo de medição e a exatidão de medição.

Tabela 1 - Resumo das informações dos instrumentos de medição das referências levantadas

Parâmetro	**Referência**	**Intervalo de medição**	**Exatidão de medição**
Temperatura do ar	(JUNGHANS; WIDERIN, 2017)	Não informado	0,3 K
	(FORGIARINI RUPP; GHISI, 2017)	0 – 60°C	±0,2ºC
	(TAKASU et al., 2017)	0 – 55ºC	±0,5ºC
	(STAZI et al., 2017)	Não informado	±0,15ºC
	(DE VECCHI et al., 2017)	0 – 60°C	±0,2ºC
Temperatura de globo	(FORGIARINI RUPP; GHISI, 2017)	0 – 60°C	±0,2ºC
	(TAKASU et al., 2017)	-60 – +155°C	±0,3ºC
	(STAZI et al., 2017)	Não informado	±0,15ºC
	(DE VECCHI et al., 2017)	0 – 60°C	±0,2ºC
Umidade relativa do ar	(JUNGHANS; WIDERIN, 2017)	Não informado	3%
	(FORGIARINI RUPP; GHISI, 2017)	5 - 96%	±3%
	(TAKASU et al., 2017)	10 – 95%	±5%
	(DE VECCHI et al., 2017)	5 - 96%	±3%
Velocidade do ar	(FORGIARINI RUPP; GHISI, 2017)	0 – 3 m/s 0 – 20 m/s	±3% ±3%
	(TAKASU et al., 2017)	0,01 – 5 m/s	0,01 – 0,99 m/s (±0,02 m/s) 1 – 5 m/s (±2% ou 0,015 m/s)
	(STAZI et al., 2017)	Não informado	0,01 m/s
	(DE VECCHI et al., 2017)	0 – 20 m/s	±3%

A partir da descrição dos artigos e das informações da Tabela 1, conclui-se que foram utilizados sensores do tipo termômetro de resistência elétrica de platina para temperatura do ar e para a temperatura de globo, sensores do tipo transdutor capacitivo para umidade relativa do ar e anemômetros térmicos para velocidade do ar. Embora a norma ISO 7726 (1998) especifique o parâmetro de umidade absoluta em vez da umidade relativa, os critérios levantados nas normas ISO 7730 (2005) e ASHRAE 55 (2013) para conforto térmico estão de acordo com a umidade relativa.

3.2 Análise de incertezas

Para a análise de incertezas, foram consideradas as seguintes informações disponíveis:

(1) Dados dos resultados de medições realizadas em fevereiro de 2010, na ocasião da pesquisa da autora (SUZUKI, 2010), no Edifício I, 23º andar, localizado em São Paulo/SP, que possuía sistema de condicionamento de ar do tipo VRV.

(2) Dados de resolução e incerteza de medição informados pelo fabricante do confortímetro DeltaOhm, modelo HD32.1, da instrumentação utilizada para a pesquisa citada acima.

Foi realizada uma análise Tipo A para os dados de medições, citados em (1) e análise Tipo B para as incertezas informadas pelo fabricante, citadas em (2).

3.2.1 Avaliação do Tipo A da incerteza de medição

Na pesquisa de SUZUKI (2010), realizaram-se medições dos parâmetros ambientais em edifícios de escritórios com sistemas de climatização artificial. Para análise de incerteza, foram considerados os resultados da medição realizada em 23/02/2010, no 23º andar de um edifício corporativo em São Paulo/SP,

que possuía sistema de ar condicionado central. Trata-se de um conjunto de amostras em que os parâmetros apresentaram valores mais estáveis ao longo do tempo.

Foram calculadas a média e o desvio padrão dos parâmetros, que estão informadas na Tabela 2 e considerados o nível de atividade de 1,2 met (69,84 W), coerente com atividade de escritório, e a vestimenta de 0,5 clo (0,078 m^2.K/W), que corresponde a traje social leve de verão.

Tabela 2 – Média e desvio padrão dos parâmetros principais para conforto térmico

Parâmetro	**Média**	**Desvio Padrão**
Temperatura do ar	24,03°C	0,21°C
Temperatura radiante média	26,14°C	0,42°C
Velocidade do ar	0,07 m/s	0,04 m/s
Umidade relativa	52 %	1,23 %

Com as informações da Tabela 2 e das observações dos parâmetros pessoais in loco, foi calculado o PMV a partir da equação 1, em que se obteve o valor de -0,03, que corresponde a uma condição próxima da neutralidade térmica conforme a Tabela E.3 para nível de atividade de 1,2 met da ISO 7730 (2005).

Os dados selecionados para análise foram coletados simultaneamente, no intervalo de um minuto, durante 80 minutos. Portanto, a amostra possui 80 elementos de cada parâmetro. A incerteza padrão de cada parâmetro, desta forma, foi calculada a partir do desvio padrão dividido pela raiz quadrada do número de amostras, multiplicado pelo coeficiente de sensibilidade, conforme a Equação 7.

$$\mu = \frac{s}{\sqrt{n}} \cdot c_s \qquad \text{Equação 7}$$

Onde:
$\mu =$ Incerteza padrão [adimensional]
$s =$ Desvio padrão [adimensional]
$n =$ Número de amostras [adimensional]
$c_s =$ Coeficiente de sensibilidade [adimensional]

Para encontrar os coeficientes de sensibilidade de cada um dos parâmetros, foram realizados os cálculos de derivada parcial de PMV com relação à temperatura do ar (T_a), temperatura média radiante (T_r), velocidade do ar (v_a) e pressão parcial de vapor de água (pa), uma vez que a equação geral de conforto contempla os quatro parâmetros ao mesmo tempo.

A equação de PMV final (Equação 8), após simplificações e substituição dos valores de metabolismo de 1,2 met, isolamento de roupa de 0,5 clo e temperatura da superfície da vestimenta de 30,4°C, calculado conforme Equação 2, foi reduzida a:

$$PMV = 0{,}05252\left[-330{,}3250 + 4{,}237 \cdot 10^{-3} \cdot pa - 0{,}09778 \cdot T_a - 4{,}3585 \cdot 10^{-8} \cdot (T_r + 273)^4 - 404{,}7188 \cdot \sqrt{v_a} + 13{,}3175 \cdot \sqrt{v_a} \cdot T_a\right] \qquad \text{Equação 8}$$

Sendo assim, as derivadas parciais foram calculadas:

$$\frac{\partial PMV}{\partial pa} = 0{,}0002225 \qquad \frac{\partial PMV}{\partial T_a} = 0{,}1902$$

$$\frac{\partial PMV}{\partial T_r} = 0{,}245 \qquad \frac{\partial PMV}{\partial v_a} = -8{,}4595$$

Na Equação 9, é considerada então as incertezas combinadas dos quatro parâmetros citados:

$$\mu_c = \pm\sqrt{{\mu_{t_a}}^2 + {\mu_{t_r}}^2 + {\mu_{v_a}}^2 + {\mu_{pa}}^2} \qquad \text{Equação 9}$$

$\mu_{t_a} =$ Incerteza padrão do parâmetro de temperatura do ar [adimensional]
$\mu_{t_r} =$ Incerteza padrão do parâmetro de temperatura radiante [adimensional]
$\mu_{v_a} =$ Incerteza padrão do parâmetro de velocidade do ar [adimensional]
$\mu_{pa} =$ Incerteza padrão do parâmetro de umidade relativa [adimensional]

Para a análise Tipo A, a incerteza padrão combinada resultou em $\mu_c = 0{,}039$, utilizando as Equações 7 e 8. Como o número de amostras é relativamente grande, pode ser considerado como uma amostra infinita, por isso foi considerado o grau de abrangência de 95% (1,96), resultando em uma incerteza expandida em $\mu_c = 0{,}078$.

3.2.2 Avaliação do Tipo B da incerteza de medição

Além da avaliação Tipo A, foram informados pelo fabricante os dados de incerteza de medição e a resolução conforme especificado na Tabela 3, que devem ser avaliados como tipo B da incerteza de medição.

Tabela 3 - Especificação dos sensores utilizados na pesquisa

Modelo	**Tipo de sensor**	**Intervalo de medição**	**Incerteza de medição**
TP3275, TP3227K e TP3227PC	Pt100	-10°C a 100°C	Classe 1/3 DIN
HP3217	Pt100 + sensor capacitivo	-10°C a 80°C 5% a 98%	Classe 1/3 DIN ± 2,5%
AP3203	Anemômetro (NTC 10Kohm)	0 m/s a 5 m/s	± 0,02 m/s (0 a 1 m/s) ± 0,1 m/s (1 a 5 m/s)

A incerteza de medição da sonda de temperatura do ar pode ser calculada de acordo com normas europeias (Equação 10):

$$\text{Classe 1/3 DIN} = \pm {}^{1}/_{3} \cdot (0{,}3 + 0{,}005 \cdot T_a) \qquad \text{Equação 10}$$

Considerando T_a = 24ºC, a incerteza calculada é de ±0,14°C. Para velocidade do ar, foi considerada a incerteza de ± 0,02 m/s (para o intervalo de 0 a 1 m/s).

Para cálculo de incerteza padrão, foi multiplicado o valor da incerteza informada pelo fabricante (por exemplo, ± 0,02 m/s para velocidade do ar) pelo coeficiente de sensibilidade, obtido a partir das derivadas parciais citadas no item 3.2.1 e dividido por $\sqrt{3}$, que é o divisor utilizado para distribuição retangular (uniforme).

A resolução do equipamento e a incerteza de calibração também foram consideradas para a avaliação Tipo B de incerteza de medição, sendo que, no caso da resolução do equipamento, para temperatura do ar e temperatura radiante média é de 0,1°C, para umidade relativa, 0,1% e para velocidade do ar, 0,01 m/s. Quanto à incerteza de calibração, foram utilizadas as informações disponíveis, de acordo com o laboratório acreditado do fabricante, que é membro de organizações de acreditação (EA, IAF, ILAC[1]), sendo 0,05°C para termômetros de resistência (na faixa de 0° a 100°C), de 0,8 a 1,5% de umidade relativa para higrômetros e termo higrômetros elétricos e mecânicos (umidade relativa na faixa de 10 a 92% e temperatura do ar entre 0º e 60°C), e 13% de incerteza de velocidade do ar para anemômetros de fio quente, na faixa de 0,1 m/s. Estes valores de incerteza são expressos com um nível de confiança de aproximadamente 95%.

Para a incerteza combinada, o cálculo é o mesmo do que do Tipo A. Se considerada isoladamente, para PMV próximo da neutralidade, a incerteza combinada tipo B é de ± 0,126. Para incerteza expandida, ±0,247.

4. RESULTADOS

Os resultados estão resumidos na Tabela 4, que contém os valores, unidades, coeficiente de sensibilidade, divisores, incerteza padrão e percentual de contribuição de cada fonte de incerteza, das avaliações tipo A e tipo B. A Tabela 5 mostra as incertezas combinada e expandida.

Tabela 4 - Resultados das avaliações tipo A e Tipo B de incerteza de medições

Fonte de incerteza	Valor	Unid.	Coef. Sensib.	Divisor	Incerteza padrão	Percentual de contribuição
Desvio padrão - medição de T_a	0,21	°C	0,1902	8,94427191	0,004465651	0,11%

[1] Respectivamente: EA (European Cooperation for Accreditation), IAF (International Accreditation Forum) e ILAC (International Laboratory Accreditation Cooperation).

Incerteza informada pelo fabricante - T_a	0,14005	°C	0,1902	1,732050808	0,015379174	1,35%
Incerteza de calibração - T_a	0,05	°C	0,1902	1,732050808	0,005490601	0,17%
Resolução do equipamento - T_a	0,1	°C	0,1902	1,732050808	0,028867513	4,77%
Desvio padrão - medição de T_r	0,42	°C	0,245	8,94427191	0,01150457	0,76%
Incerteza informada pelo fabricante - T_r	0,14005	°C	0,245	1,732050808	0,019810187	2,25%
Incerteza de calibração - T_r	0,05	°C	0,245	1,732050808	0,007072541	0,29%
Resolução da sonda - (derivada T_g)	0,1	°C	0,245	1,732050808	0,028867513	4,77%
Desvio padrão - medição de v_a	0,04	m/s	-8,4595	8,94427191	0,037832034	8,19%
Incerteza informada pelo fabricante - v_a	0,02	m/s	-8,4595	1,732050808	-0,097681892	54,59%
Incerteza de calibração - v_a	0,013	m/s	-8,4595	1,732050808	0,055987676	17,94%
Resolução da sonda - v_a	0,01	m/s	-8,4595	1,732050808	0,002886751	0,05%
Desvio padrão - medição de UR	1,23	%	0,0002225	8,94427191	3,05978E-05	0,00%
Incerteza informada pelo fabricante - UR	2,5	%	0,0002225	1,732050808	0,000321151	0,00%
Incerteza de calibração - UR	1,8	%	0,0002225	1,732050808	0,000231229	0,00%
Resolução da sonda - UR	0,1	%	0,0002225	1,732050808	0,028867513	4,77%

Tabela 5 - Resultados de incerteza combinada

Incerteza combinada	0,1322
Grau de abrangência (95%)	1,96
Incerteza expandida	0,2591

Portanto, para condições próximas da neutralidade térmica, PMV = -0,03, foi obtida uma incerteza padrão combinada de $\mu_c = \pm 0{,}13$ e uma incerteza expandida de $\mu_c = \pm 0{,}26$.

5. CONCLUSÕES

A norma ISO 7730 (2005) estabelece uma classificação de ambientes para conforto térmico, nas categorias A, B e C (Tabela), sendo que todos os critérios devem ser cumpridos simultaneamente. Para a categoria A, o estado térmico do corpo como um todo deve estar compreendido entre -0,2 a +0,2.

Tabela 6 – Categorias do ambiente térmico (Adaptado de ISO 7730, 2005)

Categoria	Estado térmico do corpo como um todo		Desconforto local			
	PPD %	PMV	DR %	PD %		
				Diferença vertical de temperatura do ar	Piso quente ou frio	Assimetria radiante
A	< 6	-0,2 < PMV < + 0,2	< 10	< 3	< 10	< 5
B	< 10	-0,5 < PMV < + 0,5	< 20	< 5	< 10	< 5
C	< 15	-0,7 < PMV < + 0,7	< 30	< 10	< 15	< 10

A incerteza de ±0,13 do PMV de -0,03, implica em um resultado entre -0,16 e +0,10, que ainda estaria dentro do intervalo da categoria A, embora muito próximo do valor limite inferior (-0,2). Se levar em

consideração a incerteza expandida, o intervalo de PMV seria de -0,29 a 0,23, suficiente para que o ambiente fosse enquadrado na categoria B.

A diferença de valores de PMV entre uma categoria e outra é de 0,3 da categoria A para a B e de 0,2 da categoria B para a C. Isto implica que, considerando que os equipamentos utilizados na pesquisa de SUZUKI (2010) estão adequados à finalidade, se comparados com pesquisas recentes realizadas no Brasil (FORGIARINI RUPP; GHISI, 2017) e em outros países (DE VECCHI et al., 2017; JUNGHANS; WIDERIN, 2017; STAZI et al., 2017; TAKASU et al., 2017), além dos requisitos da norma ISO 7726 (1998), os critérios da norma ISO 7730 (2005) para PMV estão muito rigorosos para avaliação de ambientes térmicos, pois a variação de PMV em torno da neutralidade, para a categoria A, tem valor inferior à incerteza padrão combinada expandida. Tais resultados foram levantados em um dia de verão, em que os usuários estavam utilizando vestimentas leves adequadas ao ambiente de escritório, em ambiente climatizado e clima subtropical úmido.

Como há outros requisitos a serem atendidos, que seriam a porcentagem de insatisfeitos (PPD) e o desconforto local para situações específicas (PD%), a incerteza de medição poderia também ser calculada em função de outros mensurandos, que dependem das mesmas grandezas consideradas no PMV. De acordo com a norma ISO 7730 (2005), dos itens dispostos na Tabela , alguns requisitos são difíceis de serem alcançados na prática, enquanto outras são mais fáceis e devido à exatidão dos instrumentos para medição dos parâmetros de entrada, pode ser difícil alcançar o valor de PMV para a categoria A. Nestes casos, em vez disso, a verificação deve ser baseada no intervalo de temperatura operativa equivalente.

Analisando ainda a afirmação da norma ISO 7730 (2005), referente à dificuldade ao atendimento do valor de PMV, foi realizada uma análise da contribuição de cada parâmetro para o valor final de incerteza combinada, conforme pode ser observado na última coluna à direita da Tabela 4. O parâmetro que apresenta maior porcentagem, 54,59%, é a incerteza informada pelo fabricante para a medição de velocidade do ar com anemômetro de fio quente. Em segundo lugar, com 17,94%, é a incerteza de calibração do mesmo instrumento. A terceira maior porcentagem é referente ao desvio padrão devido a medição, também de velocidade do ar, com 8,19%.

Sendo assim, é possível concluir que o parâmetro que mais contribui para a incerteza padrão do conjunto do confortímetro é a velocidade do ar. Em todas as pesquisas citadas neste trabalho, foram utilizados anemômetros de esfera ou de fio quente, que são instrumentos considerados precisos e possuem um tempo de resposta rápido. Para esta finalidade, caso fossem utilizados outros instrumentos para medição de velocidade do ar como LDA (*Laser Doppler Anemometer*), o investimento seria muito alto e poderia não justificar a precisão necessária para este tipo de estudo.

Portanto, para avaliação de ambientes térmicos, embora a faixa de PMV seja estreita e coincidente com a incerteza padrão combinada, o anemômetro de fio quente ainda é o melhor compromisso para medição da velocidade do ar. Maiores investimentos para este parâmetro são necessários caso o foco do estudo seja a avaliação de desconforto térmico localizado e de porcentagens de insatisfeitos devido aos efeitos de turbulência do ar, pois há partes do corpo humano que são mais sensíveis à temperatura e à velocidade do ar e podem influenciar a sensação térmica como um todo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSI/ASHRAE 55. American National Standards Institute. American Society of Heating, Refrigerating and Air–Conditioning Engineers. Thermal Environmental Conditions of Human Occupancy. Atlanta: ASHRAE, 2013. 28 p.

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air–Conditioning Engineers. Handbook of Fundamentals. Atlanta: ASHRAE, 2009.

BECKWITH, T. G.; MARANGONI, R. D.; LIENHARD, J. H. **Mechanical Measurements**. 5. ed. [s.l.] Addison-Wesley, 1995.

DE VECCHI, R. et al. Thermal comfort in office buildings: Findings from a field study in mixed-mode and fully-air conditioning environments under humid subtropical conditions. **Building and Environment**, v. 123, p. 672–683, out. 2017.

DOEBELIN, E. O. **Measurement Systems - application and design**. 3. ed. [s.l.] McGraw-Hill, 1983.

FANGER, O. Thermal comfort – Analysis and application in environmental engineering. Copenhagen: McGraw-Hill, 1972. 244 p.

FORGIARINI RUPP, R.; GHISI, E. Predicting thermal comfort in office buildings in a Brazilian temperate and humid climate. **Energy and Buildings**, v. 144, p. 152–166, jun. 2017.

GOLDSTEIN, R. J. **Fluid Mechanics Measurements**. 2. ed. [s.l.] Taylor & Francis, 1996.

HOLMAN, J. P. **Experimental methods for engineers**. 6. ed. New York: McGraw-Hill, 1994.

INMETRO, Guia para expressão de incerteza de medição. GUM, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 7730: Ergonomics of thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Genebra, 2005. 56 p.

_____. ISO 7726: Ergonomics of thermal environment – Instruments for measuring physical quantities. Genebra, 1998. 66 p.

JUNGHANS, L.; WIDERIN, P. Thermal comfort and indoor air quality of the “Concept 22/26”, a new high performance building standard. **Energy and Buildings**, v. 149, p. 114–122, ago. 2017.

STAZI, F. et al. Indoor air quality and thermal comfort optimization in classrooms developing an automatic system for windows opening and closing. **Energy and Buildings**, v. 139, p. 732–746, mar. 2017.

SUZUKI, E. H. **Avaliação do conforto térmico e do nível de CO2 em edifícios de escritório com climatização artificial na cidade de São Paulo.** text—[s.l.] Universidade de São Paulo, 18 out. 2010.

TAKASU, M. et al. Study on adaptive thermal comfort in Japanese offices under various operation modes. **Building and Environment**, v. 118, p. 273–288, jun. 2017.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio à pesquisa.