

AVALIAÇÃO DE TEMPERATURA E UMIDADE EM UMA CÂMARA CLIMÁTICA

Júlio D. Brionizio^{1,2}, *Fernando B. Mainier, D.Sc.*²

¹ Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qual. Industrial, Duque de Caxias, Brasil, jdbbrionizio@inmetro.gov.br

² Universidade Federal Fluminense – UFF, Niterói, Brasil, mainier@vm.uff.br

Resumo: Câmaras climáticas são equipamentos amplamente utilizados em diversos segmentos industriais e instituições de pesquisas com o objetivo de simular determinadas condições de temperatura e umidade. O Laboratório de Higrometria do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) utiliza em um dos seus sistemas de calibração de higrômetros, uma câmara climática que tem por objetivo gerar uma atmosfera onde os instrumentos sob calibração são submetidos. A avaliação da câmara é de extrema relevância para o laboratório, uma vez que as variações que ocorrem no seu interior representam uma considerável fonte de incerteza de medição na calibração de instrumentos. O objetivo deste trabalho é apresentar a metodologia e os resultados do processo de calibração e avaliação de características metrológicas da câmara climática em vários pontos de temperatura e umidade relativa.

Palavras chave: câmara climática, temperatura, umidade.

1. INTRODUÇÃO

A performance ou a vida útil de um produto, em muitos casos, é influenciada pelas condições climáticas durante sua fabricação, transporte, armazenamento ou uso. Para avaliar os efeitos que tais condições exercem no desempenho de um produto, simulações de condições climáticas são realizadas. Tais simulações permitem identificar falhas e fraquezas do produto, possibilitando assim aos fabricantes efetuarem melhorias antes que este seja posto no mercado.

Câmaras climáticas são equipamentos usados para realizar a simulação de determinadas condições de temperatura e umidade. Estes equipamentos são utilizados em diversos segmentos industriais (farmacêutico, alimentício, etc.) e em instituições de pesquisas (universidades, laboratórios, etc.) para os mais diversos fins, tais como: sistemas de calibração, pesquisas sobre conforto térmico, estudo de estabilidade de produtos farmacêuticos, ensaios de produtos (componentes eletrônicos, dispositivos mecânicos, produtos alimentícios, embalagens, etc.) e outros.

O Laboratório de Higrometria do Inmetro (Lahig), referência do País em umidade, possui dois sistemas de calibração de instrumentos de medição de temperatura e umidade (termohigrômetros, higrômetros, psicrômetros, etc.). Um sistema utiliza um gerador de ponto de orvalho para gerar uma determinada atmosfera e o outro utiliza uma câmara climática. Boa parte dos serviços de calibração

prestados pelo laboratório são realizados através da câmara climática, por esta razão este equipamento é de extrema relevância para o laboratório.

O interior da câmara apresenta variações de temperatura de um lugar para o outro, ou seja, alguns locais são mais frios ou mais quentes do outros. Tais variações são usualmente chamadas de gradientes térmicos. No interior do dispositivo ocorrem ainda variações de temperatura ao longo do tempo. Estas variações são usualmente chamadas de flutuações. As variações de temperatura ao longo do tempo são geralmente pequenas quando comparadas com as variações de temperatura no espaço [1].

É de extrema relevância que as medições realizadas nestes equipamentos sejam confiáveis, pois medições inadequadas podem levar a conclusões equivocadas sobre os ensaios realizados. No caso do Lahig, o efeito das diferenças de temperatura no interior da câmara é uma considerável fonte de incerteza na calibração de instrumentos.

Neste trabalho, a avaliação de temperatura e umidade no interior da câmara não foi executada no volume interno total do equipamento, mas sim numa região de interesse do laboratório definida como espaço de trabalho. Para medição de temperatura e umidade relativa no espaço de trabalho, sensores de resistência de platina e um higrômetro de ponto de orvalho foram utilizados. Foram analisados os seguintes pontos de temperatura: 0 °C, 5 °C, 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C, 35 °C, 40 °C, 45 °C, 50 °C, 55 °C, 60 °C, 65 °C e 70 °C. Os pontos de umidade relativa analisados foram os seguintes: 30 %ur, 45 %ur, 60 %ur, 75 %ur e 90 %ur, todos medidos na temperatura de 20 °C.

2. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Foi utilizada uma câmara climática com dimensões internas de 680 mm de altura x 540 mm de largura x 820 mm de profundidade, faixa de operação de umidade relativa de 10 %ur a 98 %ur (na faixa de temperatura de 10 °C a 95 °C) e faixa de operação de temperatura de -75 °C a +180 °C. A câmara possui resoluções de 0,1 °C e 0,1 %ur. O controle da temperatura e da umidade relativa do ar no seu interior é feito através de dois termômetros de resistência de platina de 100 Ω, onde um mede a temperatura e o outro, revestido por um tecido de algodão (mecha), mede a temperatura de bulbo úmido (método psicrométrico). A câmara pode ser operada por um painel lateral ou por um computador.

Para medição da umidade no espaço de trabalho, um higrômetro de ponto de orvalho, do tipo espelho resfriado, foi utilizado. O instrumento opera na faixa de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura de ponto de orvalho, possui resolução de $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ e suas medições são rastreáveis aos gerador de referência de umidade do laboratório de higrimetria do *Centre Technique des Industries Aerauliques et Thermiques* (CETIAT).

Para medição da temperatura no espaço de trabalho, nove sensores de resistência de platina de $100\ \Omega$ foram utilizados. Os sensores foram conectados a quatro fios a um indicador digital de dezesseis canais com resolução de $0,0001\text{ }^{\circ}\text{C}$. Os sensores foram calibrados juntamente com o indicador digital, na faixa de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, no Laboratório de Termometria do Inmetro (Later).

Para fazer a aquisição das leituras de temperatura e umidade da câmara e da temperatura de ponto de orvalho do higrômetro, um multímetro digital de $6\ \frac{1}{2}$ dígitos foi usado. O instrumento foi calibrado pela Divisão de Metrologia Elétrica do Inmetro (Diele).

2.1. Verificações dos instrumentos padrões

Segundo a norma NBR ISO/IEC 17025, verificações são necessárias à manutenção da confiança na situação da calibração dos padrões de referência e devem ser realizadas de acordo com procedimentos e cronogramas definidos [2]. Desta forma, a verificação dos termômetros e do higrômetro se fez necessária.

O higrômetro padrão foi comparado com outro higrômetro padrão na faixa de sobreposição, ou seja, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ de ponto de orvalho. Foi utilizado para o julgamento da qualidade dos resultados de medição, o cálculo do erro normalizado (E_n) em relação a incerteza. Todos os valores de E_n foram menores do que 1, isto significa que as medições são aceitáveis, ou seja, os higrômetros concordam dentro das suas incertezas expandidas [3].

Os sensores de resistência de platina foram verificados através da medição do valor de suas resistências a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ no ponto do gelo (R_0). Foi determinada, para cada sensor, a incerteza propagada devido à variação da calibração.

3. MONTAGEM DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

O espaço de trabalho definido no interior da câmara possui as seguintes dimensões: 540 mm de altura x 430 mm de largura x 500 mm de profundidade. O centro do espaço de trabalho é equivalente ao centro da parte interna da câmara climática. Buscou-se definir um espaço de trabalho que não fosse tão grande, para que este não apresentasse grandes diferenças de temperatura, fonte de incerteza na calibração de instrumentos, e nem tão pequeno, para que este não restringisse muito a quantidade de instrumentos que podem ser calibrados simultaneamente.

Com relação às medições de umidade, o higrômetro utilizado foi posicionado do lado de fora da câmara e não no seu interior. Sendo assim, um sistema de amostragem para condução do ar gerado pela câmara até o instrumento se fez necessário. A extremidade deste sistema foi posicionada no

centro do espaço de trabalho. O higrômetro de ponto de orvalho é responsável pela medição da temperatura de ponto de orvalho do ar. Temperatura de ponto de orvalho consiste na temperatura na qual a pressão do vapor de um gás úmido é igual a pressão de saturação do vapor sobre o líquido puro e na qual o condensado se forma como líquido no resfriamento do gás [4]. Conforme a norma NF X15-140 [5], o guia DKD-R 5-7 [6] e o guia *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* [7], a medição da temperatura de ponto de orvalho do ar pode ser feita em um único ponto, pois esta é considerada uniforme no interior da câmara.

Com relação às medições de temperatura, foi utilizado um sensor em cada canto do espaço de trabalho e um no centro. A passagem dos fios dos sensores de temperatura de dentro para fora da câmara foi feita através da porta. Como os fios são bem finos e como a porta da câmara é fechada com bastante pressão, devido suas borrachas de vedação, logo não houve qualquer tipo de infiltração de ar do laboratório para o seu interior.

A figura 1, a seguir, mostra a representação do espaço de trabalho no interior da câmara.

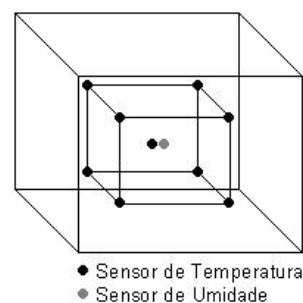


Fig. 1. Espaço de trabalho no interior da câmara

A tabela 1, a seguir, apresenta a identificação e a localização dos sensores de temperatura na composição do espaço de trabalho.

Tabela 1. Identificação e localização dos termômetros

Nº	Nº Série	Localização	
		Plano	Extremidade
01	1567/97	Frontal (PF)	Superior Esquerdo (SE)
02	1570/97	Frontal (PF)	Superior Direito (SD)
03	1569/97	Frontal (PF)	Inferior Direito (ID)
04	2426/97	Frontal (PF)	Inferior Esquerdo (IE)
05	3014/97	Centro do Espaço de Trabalho (C)	
06	0173/97	Traseiro (PT)	Superior Esquerdo (SE)
07	0174/97	Traseiro (PT)	Superior Direito (SD)
08	0175/97	Traseiro (PT)	Inferior Direito (ID)
09	0176/97	Traseiro (PT)	Inferior Esquerdo (IE)

As distâncias dos planos frontal e posterior do espaço de trabalho para a porta e para a parede traseira da câmara foram de 160 mm . Já as distâncias dos planos superior e inferior do espaço de trabalho para as paredes da câmara foram de 70 mm . As distâncias dos planos laterais do espaço de trabalho para as paredes da câmara foram de 55 mm .

A figura 2, a seguir, mostra a montagem do sistema de medição no interior da câmara climática.



Fig. 2. Sistema de medição no interior da câmara

4. MEDIÇÕES DE TEMPERATURA E UMIDADE

Todos os pontos de temperatura foram medidos na umidade relativa de 50 %ur, exceto os pontos 0 °C e 5 °C, pois a câmara climática não opera com controle de umidade nestes pontos. Já os pontos de umidade relativa foram todos medidos na temperatura de 20 °C.

Em todos os pontos de medição, o tempo de estabilização da atmosfera foi de aproximadamente uma hora. Após a estabilização, noventa medidas foram tomadas, em intervalos de trinta segundos, dos instrumentos de referência (termômetros e higrômetro) e das indicações da câmara climática (temperatura e umidade relativa).

A figura 3, a seguir, mostra o comportamento da câmara no ponto 0 °C.

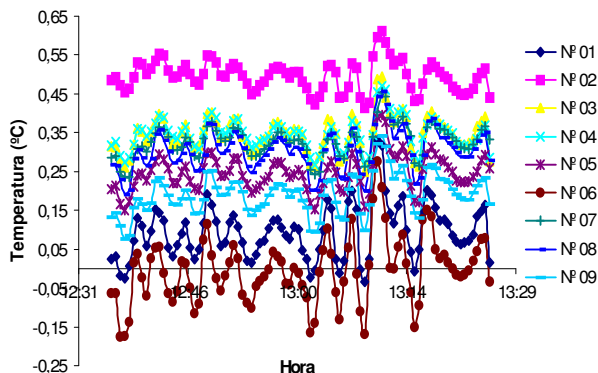


Fig. 3. Medições de temperatura no interior da câmara

A umidade relativa de cada local de medição do espaço de trabalho foi determinada em cada instante por meio da temperatura medida no respectivo local e da temperatura de ponto de orvalho medida no centro do espaço do trabalho. A equação 1, a seguir, foi então utilizada para determinar os valores de umidade relativa. Os valores de pressão do vapor

d'água foram determinados segundo a equação de Sonntag para a água (equação 2, a seguir) [8].

$$Umidade\ relativa = \frac{p_v}{p_{sv}} \times 100 \quad (1)$$

$$\ln p_{sv}(T) = -6096,9385 \times T^{-1} + 21,2409642 - 2,711193 \times \dots \dots 10^{-2} \times T + 1,673952 \times 10^{-5} \times T^2 + 2,433502 \times \ln T \quad (2)$$

Onde,

- p_v – pressão parcial do vapor d'água
- p_{sv} – pressão de saturação do vapor d'água
- T – temperatura em kelvin

A figura 4, a seguir, mostra o comportamento da câmara no ponto 60 %ur a 20 °C.

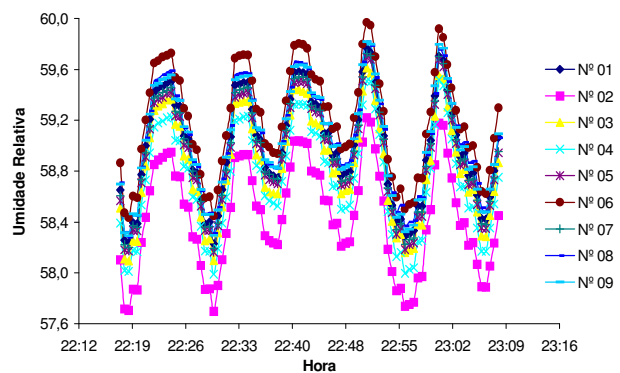


Fig. 4. Medições de umidade no interior da câmara

5. RESULTADOS OBTIDOS

As tabelas 2, 3 e 4, a seguir, mostram as temperaturas médias dos locais de medição, as temperaturas médias do espaço de trabalho (T) e as temperaturas médias da câmara climática (T_c). As temperaturas médias máximas e mínimas estão em negrito.

Tabela 2. Valores médios de temperatura: 0 a 20 °C

Nº	Local	0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C
01	PF-SE	0,095	5,446	10,441	15,474	20,486
02	PF-SD	0,496	5,622	10,604	15,630	20,620
03	PF-ID	0,346	5,445	10,459	15,515	20,535
04	PF-IE	0,346	5,589	10,550	15,553	20,537
05	C	0,247	5,472	10,468	15,502	20,510
06	PT-SE	-0,004	5,405	10,395	15,418	20,429
07	PT-SD	0,326	5,423	10,433	15,485	20,499
08	PT-ID	0,305	5,343	10,366	15,435	20,469
09	PT-IE	0,192	5,419	10,424	15,462	20,475
T		0,261	5,463	10,460	15,497	20,507
T_c		0,24	5,13	10,07	15,14	20,08

Tabela 3. Valores médios de temperatura: 25 a 45 °C

Nº	Local	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C	45 °C
01	PF-SE	25,513	30,578	35,602	40,655	45,652
02	PF-SD	25,614	30,655	35,652	40,666	45,660
03	PF-ID	25,549	30,626	35,642	40,679	45,706

Nº	Local	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C	45 °C
04	PF-IE	25,536	30,583	35,589	40,617	45,597
05	C	25,525	30,599	35,616	40,660	45,669
06	PT-SE	25,460	30,558	35,593	40,660	45,653
07	PT-SD	25,513	30,588	35,603	40,642	45,674
08	PT-ID	25,489	30,568	35,586	40,631	45,685
09	PT-IE	25,496	30,583	35,608	40,662	45,691
T		25,522	30,593	35,610	40,652	45,665
T_C		25,08	30,04	35,04	39,98	45,03

Tabela 4. Valores médios de temperatura: 50 a 70 °C

Nº	Local	50 °C	55 °C	60 °C	65 °C	70 °C
01	PF-SE	50,634	55,582	60,525	65,472	70,441
02	PF-SD	50,672	55,650	60,621	65,602	70,604
03	PF-ID	50,760	55,784	60,800	65,829	70,878
04	PF-IE	50,570	55,509	60,448	65,395	70,362
05	C	50,683	55,664	60,640	65,625	70,634
06	PT-SE	50,613	55,539	60,460	65,384	70,334
07	PT-SD	50,739	55,772	60,800	65,840	70,900
08	PT-ID	50,792	55,864	60,931	66,014	71,117
09	PT-IE	50,735	55,750	60,762	65,788	70,837
T		50,689	55,680	60,665	65,661	70,678
T_C		49,97	54,91	59,92	64,87	69,91

A tabela 5, a seguir, mostra os valores médios de umidade relativa dos locais de medição, os valores médios de umidade relativa do espaço de trabalho (UR) e os valores médios de umidade relativa da câmara climática (UR_C). Os valores médios máximos e mínimos de umidade relativa estão em negrito.

Tabela 5. Valores médios de umidade relativa (%ur)

Nº	Local	30	45	60	75	90
01	PF-SE	27,45	43,32	58,99	74,67	90,03
02	PF-SD	27,48	43,06	58,44	73,87	88,98
03	PF-ID	27,78	43,40	58,85	74,36	89,55
04	PF-IE	27,32	43,12	58,74	74,37	89,68
05	C	27,53	43,31	58,92	74,55	89,87
06	PT-SE	27,37	43,38	59,20	75,00	90,50
07	PT-SD	27,79	43,48	58,95	74,48	89,67
08	PT-ID	27,95	43,61	59,06	74,59	89,77
09	PT-IE	27,54	43,36	59,05	74,75	90,14
UR		27,58	43,34	58,91	74,52	89,80
UR_C		30,05	44,99	59,95	74,96	89,89

Determinar os valores médios de temperatura e umidade relativa e não associar a estes valores uma incerteza faz com que a avaliação fique incompleta, pois o que adianta saber os valores médios sem saber o quanto estes podem variar. Segundo o Guia para a Expressão da Incerteza de Medição, incerteza expandida é a grandeza que define um intervalo em torno do resultado de uma medição com o qual se espera abranger uma grande fração da distribuição dos valores que possam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando [9].

O cálculo da incerteza expandida, pelo método de análise do caso médio do guia *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* [7], foi realizado através da multiplicação da incerteza padrão combinada, determinada através da raiz quadrada da soma

das incertezas ao quadrado, pelo fator de abrangência $k=2$, o que fornece uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

No caso de temperatura, a incerteza referente ao sistema de medição (u_{st}) foi determinada para cada local de medição, levando-se em consideração a incerteza combinada do termômetro, a incerteza propagada devido à variação da calibração e a resolução do indicador digital. O maior valor obtido foi adotado.

No caso de umidade, a incerteza referente ao sistema de medição (u_{sur}) foi determinada para cada local de medição, levando-se em consideração a incerteza combinada do termômetro, a incerteza propagada devido à variação da calibração do termômetro, a incerteza combinada do higrômetro, as resoluções do indicador digital de temperatura e do higrômetro e a incerteza do ajuste da curva de correção do higrômetro. O maior valor foi adotado. Cabe ressaltar que, como as incertezas e as resoluções do termômetro e do higrômetro estão expressas em grau Celsius e como as incertezas dos sistemas de medição de umidade relativa devem ser expressas em percentual de umidade relativa (%ur), então coeficientes de sensibilidade foram utilizados.

As variações de temperatura e umidade relativa no espaço foram obtidas através da determinação dos gradientes. Foi calculado para cada instante do período de medição o desvio padrão experimental das leituras e o maior valor encontrado foi assumido como o gradiente daquele ponto.

As variações de temperatura e umidade relativa ao longo do tempo foram obtidas através da determinação das flutuações. Foi calculado para cada local de medição o desvio padrão experimental das leituras e o maior valor encontrado foi assumido como a flutuação daquele ponto.

Os gradientes de temperatura (δ_{Gt}) e umidade relativa (δ_{Gur}) e as flutuações de temperatura (δ_{Ft}) e umidade relativa (δ_{Fur}) baseiam-se numa distribuição normal pois são provenientes de um conjunto de medições.

O desvio padrão experimental da temperatura média de referência do espaço de trabalho (δT) foi obtido através da divisão do desvio padrão experimental das medições pela raiz quadrada do número de medidas e equivale a uma distribuição normal.

O desvio padrão experimental da umidade relativa média de referência do espaço de trabalho (δU) foi obtido através da divisão do desvio padrão experimental das medições pela raiz quadrada do número de medidas e equivale a uma distribuição normal.

O desvio padrão experimental da temperatura média da câmara climática (δT_C) foi obtida através da divisão do desvio padrão experimental das medições pela raiz quadrada do número de medidas e equivale a uma distribuição normal.

O desvio padrão experimental da umidade relativa média da câmara climática (δU_C) foi obtida através da divisão do desvio padrão experimental das medições pela raiz quadrada do número de medidas e equivale a uma distribuição normal.

A incerteza devido à resolução da indicação de temperatura da câmara (δT_{res}) foi estimada como sendo a metade do valor do dígito e equívale a meia largura de uma distribuição de probabilidade retangular.

A incerteza devido à resolução da indicação de umidade relativa da câmara (δU_{res}) foi estimada como sendo a metade do valor do dígito e equívale a meia largura de uma distribuição de probabilidade retangular.

A tabela 6, a seguir, apresenta as temperaturas médias de referência (T), as contribuições de incerteza e as incertezas expandidas (U_T).

Tabela 6. Incertezas de temperatura (°C)

T	u_{st}	δ_{Gt}	δ_{Ft}	$u(\delta T)$	$u(\delta T_C)$	$u(\delta T_{res})$	U_T
0,26	0,03	0,189	0,085	0,005	0,0094	0,0289	0,42
5,46	0,03	0,100	0,032	0,003	0,0047	0,0289	0,23
10,46	0,03	0,084	0,027	0,003	0,0045	0,0289	0,20
15,50	0,03	0,077	0,049	0,003	0,0058	0,0289	0,20
20,51	0,03	0,064	0,026	0,002	0,0000	0,0289	0,16
25,52	0,03	0,052	0,027	0,002	0,0049	0,0289	0,14
30,59	0,03	0,040	0,030	0,001	0,0039	0,0289	0,13
35,61	0,03	0,029	0,029	0,001	0,0052	0,0289	0,12
40,65	0,03	0,024	0,027	0,001	0,0052	0,0289	0,11
45,67	0,03	0,040	0,026	0,001	0,0051	0,0289	0,13
50,69	0,03	0,085	0,030	0,003	0,0052	0,0289	0,20
55,68	0,03	0,134	0,058	0,004	0,0089	0,0289	0,30
60,67	0,03	0,178	0,058	0,006	0,0058	0,0289	0,38
65,66	0,03	0,228	0,043	0,007	0,0050	0,0289	0,47
70,68	0,03	0,283	0,044	0,009	0,0050	0,0289	0,58

A tabela 7, a seguir, apresenta para cada temperatura de ajuste na câmara (T_a), a temperatura média da câmara (T_C); a temperatura média de referência do espaço de trabalho (T); a correção da indicação de temperatura (ΔT_{in}), que equívale a diferença entre a temperatura média de referência do espaço de trabalho e a temperatura média da câmara climática; e a incerteza expandida da calibração da câmara climática (U_T).

Tabela 7. Apresentação dos resultados (°C)

T_a	T_C	T	ΔT_{in}	U_T
0	0,24	0,26	0,02	0,42
5	5,13	5,46	0,33	0,23
10	10,07	10,46	0,39	0,20
15	15,14	15,50	0,36	0,20
20	20,08	20,51	0,43	0,16
25	25,08	25,52	0,44	0,14
30	30,04	30,59	0,55	0,13
35	35,04	35,61	0,57	0,12
40	39,98	40,65	0,67	0,11
45	45,03	45,67	0,64	0,13
50	49,97	50,69	0,72	0,20
55	54,91	55,68	0,77	0,30
60	59,92	60,67	0,75	0,38
65	64,87	65,66	0,79	0,47
70	69,91	70,68	0,77	0,58

A tabela 8, a seguir, apresenta os valores médios de umidade relativa de referência (UR), as contribuições de incerteza e as incertezas expandidas (U_{UR}).

Tabela 8. Incertezas de umidade relativa (%ur)

UR	U_{sur}	δ_{Gur}	δ_{Fur}	$u(\delta U)$	$u(\delta U_C)$	$u(\delta U_{res})$	U_{UR}
27,58	0,086	0,23	0,32	0,0132	0,0277	0,0289	0,81
43,34	0,130	0,18	0,22	0,0093	0,0155	0,0289	0,63
58,91	0,173	0,24	0,42	0,0164	0,0314	0,0289	1,04
74,52	0,215	0,36	0,84	0,0307	0,0765	0,0289	1,88
89,80	0,255	0,46	0,50	0,0211	0,0407	0,0289	1,45

A tabela 9, a seguir, apresenta, para cada umidade relativa de ajuste na câmara (UR_a), a umidade relativa média da câmara (UR_C); a umidade relativa média de referência do espaço de trabalho (UR); a correção da indicação de umidade relativa (ΔUR_{in}), que equívale a diferença entre a umidade relativa média de referência do espaço de trabalho e a umidade relativa média da câmara climática; e a incerteza expandida da calibração da câmara climática (U_{UR}).

Tabela 9. Apresentação dos resultados (%ur)

T_a	T_C	T	ΔT_{in}	U_T
30	30,0	27,6	-2,4	0,8
45	45,0	43,3	-1,7	0,6
60	60,0	58,9	-1,1	1,0
75	75,0	74,5	-0,5	1,9
90	89,9	89,8	-0,1	1,5

As incertezas expandidas, pelo método de análise do pior caso do guia *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* [7], foram calculadas através das seguintes equações:

$$\text{Temperatura: } U_{Ta} = \Delta T_{max} + 2 \times \delta_{Ft} + U_{st} \quad (3)$$

Onde,

ΔT_{max} – maior diferença entre a temperatura média de referência de um local de medição e a temperatura de ajuste

δ_{Ft} – incerteza referente à flutuação de temperatura do sensor que registrou ΔT_{max}

U_{st} – incerteza expandida do sistema de medição de temperatura que registrou ΔT_{max}

U_{Ta} – incerteza expandida da temperatura ajustada

$$\text{Umidade Relativa: } U_{URa} = \Delta UR_{max} + 2 \times \delta_{Fur} + U_{sur} \quad (4)$$

Onde,

ΔUR_{max} – maior diferença entre a umidade relativa média de referência de um local de medição e a umidade relativa de ajuste

δ_{Fur} – incerteza referente à flutuação de umidade relativa do sensor que registrou ΔUR_{max}

U_{sur} – incerteza expandida do sistema de medição de umidade relativa que registrou ΔUR_{max}

U_{URa} – incerteza expandida da umidade relativa ajustada

A tabela 10, a seguir, apresenta as incertezas expandidas das temperaturas ajustadas na câmara climática.

Tabela 10. Incertezas associadas às temperaturas ajustadas (°C)

T_a	ΔT_{\max}	δ_{Ft}	U_{st}	U_{Ta}
0	0,496	0,0387	0,030	0,60
5	0,622	0,0189	0,030	0,69
10	0,604	0,0170	0,030	0,67
15	0,630	0,0425	0,030	0,74
20	0,620	0,0220	0,030	0,69
25	0,614	0,0177	0,030	0,68
30	0,655	0,0266	0,030	0,74
35	0,652	0,0218	0,030	0,73
40	0,679	0,0222	0,039	0,76
45	0,706	0,0193	0,039	0,78
50	0,792	0,0300	0,050	0,90
55	0,864	0,0578	0,050	1,0
60	0,931	0,0581	0,050	1,1
65	1,014	0,0433	0,050	1,2
70	1,117	0,0433	0,050	1,3

A tabela 11, a seguir, apresenta as incertezas expandidas dos valores de umidade ajustados na câmara climática

Tabela 11. Incertezas associadas aos valores de umidade ajustados

UR_a (%ur)	ΔUR_{\max} (%ur)	δ_{Fur} (%ur)	U_{sur} (%ur)	U_{Ura} (%ur)
30,0	2,68	0,312	0,161	3,5
45,0	1,94	0,208	0,231	2,6
60,0	1,56	0,420	0,304	2,7
75,0	1,13	0,819	0,375	3,1
90,0	1,02	0,428	0,442	2,3

6. CONCLUSÕES

As câmaras apresentam desempenho distintos uma das outras em função do tamanho, tipo de ventilação, sistema de controle, etc. Avaliar o perfil de temperatura e de umidade destes equipamentos é extremamente importante, visto que a avaliação garante a confiabilidade nos resultados das condições simuladas, sustentando assim os resultados dos ensaios realizados nestes dispositivos. Cabe ressaltar que, a avaliação deve ser executada de maneira que atenda as necessidades do usuário; ou seja, deve-se inicialmente identificar os objetivos da avaliação para então planejar e definir a melhor forma de como esta deve ser executada.

Um relevante aspecto que deve ser considerado na avaliação de uma câmara refere-se à aquisição das medições. Durante esta etapa, diversos instrumentos precisam ser lidos em um curto intervalo de tempo. Sendo assim, é inviável executar todas as leituras de forma manual. Logo, a aquisição automática dos dados se faz necessária. A utilização de instrumentos que podem ter suas medições armazenadas em um computador, através de saída RS-232 ou de outro tipo, é uma boa opção. Outra hipótese, é a utilização de instrumentos que fazem a armazenagem dos dados na sua própria memória, são os chamados *data loggers*.

Com relação ao guia *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* [7], duas formas de calcular a incerteza são possíveis: pelo caso médio e pelo pior caso. A análise pelo pior caso, é muito prática para o usuário, uma vez que este não precisa se preocupar com as indicações do equipamento e suas correções. Por este método, o usuário saberá que, para um determinado ajuste da câmara, nenhuma medição esteve fora dos limites superior e inferior definidos pela incerteza de medição, com um determinado nível de confiança. Porém, tal método só deve ser empregado quando a finalidade na qual a câmara se destina, não requer baixas incertezas.

Através da avaliação da câmara, diversos parâmetros metrológicos puderam ser obtidos. Alguns dos valores obtidos neste trabalho são utilizados como fontes de incerteza nas calibrações de sensores de temperatura e umidade relativa que são realizadas pelo laboratório.

REFERÊNCIAS

- [1] N. Robinson, "Calibration of climatic chambers and sterilising autoclaves".
- [2] NBR ISO/IEC 17025, "Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração", *Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)*, 2005.
- [3] J. D. Brionizio, S. G. Lima, F. B. Mainier, "Comparação intralaboratorial em higrometria", *Anais do Encontro para a Qualidade de Laboratórios – Enqualab 2005 (CD-ROM)*, São Paulo, 2005.
- [4] BS 1339-1, "Humidity – Part 1: Terms, definitions and formulae", *British Standards Institution (BSI)*, Londres, 2002.
- [5] NF X15-140, "Measurement of air moisture – Climatic and thermostatic chambers – characterisation and verification", *Association Française de Normalisation (AFNOR)*, França, outubro, 2002.
- [6] DKD-R 5-7, "Kalibrierung von klimaschränken", *Deutscher Kalibrierdienst (DKD)*, Alemanha, 2004.
- [7] SEE, "A guide to calculating the uncertainty of the performance of environmental chambers", *Society of Environmental Engineers (SEE)*, Londres, 2003.
- [8] Michell, NPL, IMC, "A guide to the measurement of humidity", *Michell Instruments, National Physical Laboratory, Institute of Measurement and Control*, Londres, 1996.
- [9] ABNT & INMETRO, "Guia para a expressão da incerteza de medição", *Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) & Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO)*, 3ª Edição, Rio de Janeiro, agosto, 2003.