

**UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
CENTRO TECNOLÓGICO – ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

JÚLIO DUTRA BRIONIZIO

**ANÁLISE CRÍTICA DAS METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO
DE TEMPERATURA E UMIDADE EM CÂMARAS
CLIMÁTICAS E TÉRMICAS**

**Niterói
2006**

JÚLIO DUTRA BRIONIZIO

**ANÁLISE CRÍTICA DAS METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO
DE TEMPERATURA E UMIDADE EM CÂMARAS
CLIMÁTICAS E TÉRMICAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional em Sistemas de Gestão da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Sistemas de Gestão. Área de Concentração: Sistema de Gestão pela Qualidade Total.

Orientador: Prof. Fernando B. Mainier, D. Sc.

**Niterói
2006**

JÚLIO DUTRA BRIONIZIO

**ESTUDO DAS METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DE
TEMPERATURA E UMIDADE EM CÂMARAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional em Sistemas de Gestão da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Sistemas de Gestão. Área de Concentração: Sistema de Gestão pela Qualidade Total.

Prof. Fernando B. Mainier, D. Sc. – Orientador
Universidade Federal Fluminense

Prof^a. Rosenir Rita de Cássia Moreira da Silva, D. Sc.
Universidade Federal Fluminense

Prof. Alcir de Faro Orlando, D. Sc.
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Dedico este trabalho

À minha esposa Deise, amiga de todas as horas, pelo incentivo e suporte familiar e por tudo que vivemos e viremos juntos.

Ao meu filho Felipe, o maior presente que recebi de Deus, pela alegria, amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus, pela vida, por mais esta oportunidade e por sempre iluminar meus caminhos e me auxiliar nos momentos difíceis.

Aos meus pais, alicerces da minha formação moral e acadêmica, pelo incentivo que sempre ofereceram para a concretização dos meus sonhos.

Ao INMETRO que me propiciou todo o suporte e viabilizou o curso.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando B. Mainier, pela valiosa orientação, amizade e parceria para a realização desta dissertação e dos artigos.

A equipe do LATEC/UFF pela dedicação com que buscam qualificar profissionalmente este curso.

Ao gerente e colega Paulo Roberto da Fonseca Santos, M. Sc., por ter feito minha indicação ao mestrado, pelos comentários no capítulo 1 e pelo apoio.

Ao colega Renato Nunes Teixeira, M. Sc., por ter feito minha indicação ao mestrado e pelo auxílio na automação dos equipamentos.

Ao colega Slavolhub Garcia Petkovic pelo auxílio na estimativa da incerteza da variação da calibração dos termômetros.

Ao companheiro Saulo Gurgel de Lima pelo auxílio na realização das medições, pelo incentivo e apoio durante a elaboração deste trabalho.

Ao colega Antônio Carlos Baratto, D. Sc., pelas muitas discussões sobre o tema da dissertação.

A todos os colegas e profissionais do INMETRO, a todos os amigos e a todos os familiares que estimularam e ajudaram, de forma direta ou indireta, para a elaboração desta dissertação.

RESUMO

Câmaras climáticas e câmaras térmicas são equipamentos amplamente utilizados em diversos segmentos industriais e instituições de pesquisas com o objetivo de simular determinadas condições ambientais. Em muitos casos, é de extrema relevância que as medições realizadas nestes equipamentos sejam confiáveis, uma vez que medições inadequadas podem levar a conclusões equivocadas sobre os testes realizados. Desta forma, a calibração da câmara torna-se fundamental para garantir a confiabilidade nos resultados das condições simuladas e para permitir ao usuário que conheça o desempenho e as características metrológicas do equipamento. Esta dissertação apresenta então um estudo de três métodos de calibração/caracterização de câmara de três países distintos. Este trabalho faz uma exposição do problema, avalia diversos aspectos dos documentos, aborda os temas higrometria e termometria, apresenta um estudo de caso e faz considerações sobre o assunto.

Palavras-chave: Câmara, Temperatura, Umidade, Incerteza de Medição, Metrologia

ABSTRACT

Climatic and thermostatic chambers are equipment widely used in many industrial fields e research institutes in order to simulate certain environmental conditions. In many cases, it is extreme important that the measurements carried out in these equipment be reliable, once inadequate measurements can lead to equivocal conclusions about the tests performed. So, the calibration of the chamber is essential to guarantee the confidentiality of the results of the simulated conditions and to allow the user to get knowledge of the performance and metrological characteristics of the equipment. This dissertation presents a study of three calibration/characterisation methods of chamber from three different countries. This work exhibits the problem, analyses several aspects of the documents, speaks about hygrometry and thermometry, shows a case study and makes considerations about the subject.

Keywords: Chamber, Temperature, Humidity, Measurement Uncertainty, Metrology

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Tipo de câmara	19
Figura 2	Tipo de câmara	19
Figura 3	Tipo de câmara	19
Figura 4	Tipo de câmara	19
Figura 5	Representação do espaço de trabalho no volume interno	31
Figura 6	Posicionamento dos sensores de temperatura para volumes de 2 m ³ ou menores	39
Figura 7	Posicionamento dos sensores de temperatura para volumes maiores do que 2 m ³ e menores ou iguais a 20 m ³	40
Figura 8	Registrador (<i>data logger</i>)	43
Figura 9	Registrador (<i>data logger</i>)	43
Figura 10	Tipos de termistores	46
Figura 11	Tipos de termistores	46
Figura 12	Tipos de termistores	46
Figura 13	Tipos de termistores	46
Figura 14	Aumento da pressão de saturação do vapor d'água com a temperatura	59
Figura 15	Psicrômetro aspirado	65
Figura 16	Psicrômetro não aspirado	65
Figura 17	Termohigrômetro	66
Figura 18	Termohigrômetro	66
Figura 19	Termohigrômetro	66
Figura 20	Higrômetro óptico	67
Figura 21	Higrômetro óptico	67
Figura 22	Termômetro de resistência	71
Figura 23	Termômetros de resistência	71
Figura 24	Efeito Seebeck em um circuito de termopar	72
Figura 25	Efeito Seebeck em um circuito de termopar	72
Figura 26	Efeito Seebeck em um circuito de termopar	72
Figura 27	Termopares	73
Figura 28	Laboratório de higrometria do INMETRO	80

Figura 29	Câmara climática	81
Figura 30	Higrômetro de ponto de orvalho	82
Figura 31	Sensores de resistência de platina	83
Figura 32	Indicador digital de temperatura	83
Figura 33	Multímetro digital	84
Figura 34	Temperaturas médias antes (○) e após (●) os novos valores de $R_{0,01}$ (1 ^a Verificação)	90
Figura 35	Temperaturas médias antes (○) e após (●) os novos valores de $R_{0,01}$ (2 ^a Verificação)	92
Figura 36	Espaço de trabalho no interior da câmara	94
Figura 37	Posicionamento dos sensores no interior da câmara	95
Figura 38	Sistema de medição no interior da câmara	96
Figura 39	Sistema de medição no interior da câmara	97
Figura 40	Medições de temperatura no interior da câmara (0 °C)	98
Figura 41	Medições de temperatura no interior da câmara (70 °C)	98
Figura 42	Medições de umidade relativa no interior da câmara (30 %ur)	99
Figura 43	Medições de umidade relativa no interior da câmara (60 %ur)	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Sensores de temperatura e as suas propriedades físicas transdutoras	69
Tabela 2	Efeito da mudança de 1 °C	80
Tabela 3	Resultados da comparação dos higrômetros de referência	87
Tabela 4	Temperaturas médias antes (T_1) e após (T_2) os novos valores de $R_{0,01}$ (1ª Verificação)	89
Tabela 5	Incerteza propagada devido à variação da calibração do sensor (°C) (1ª Verificação)	91
Tabela 6	Temperaturas médias antes (T_1) e após (T_2) os novos valores de $R_{0,01}$ (2ª Verificação)	92
Tabela 7	Incerteza propagada devido à variação da calibração do sensor (°C) (2ª Verificação)	93
Tabela 8	Identificação e localização dos termômetros	94
Tabela 9	Valores médios de temperatura (°C): 0 °C a 30 °C	101
Tabela 10	Valores médios de temperatura (°C): 35 °C a 70 °C	101
Tabela 11	Valores médios de umidade relativa	102
Tabela 12	Incertezas dos termômetros	103
Tabela 13	Incertezas do sistemas de medição de temperatura (°C)	104
Tabela 14	Desvios padrões de temperatura (°C): 0 °C a 30 °C	104
Tabela 15	Desvios padrões de temperatura (°C): 35 °C a 70 °C	105
Tabela 16	Incertezas expandidas das temperaturas médias de referência dos locais de medição (°C): 0 °C a 30 °C	105
Tabela 17	Incertezas expandidas das temperaturas médias de referência dos locais de medição (°C): 35 °C a 70 °C	106
Tabela 18	Gradientes de temperatura (°C): 0 °C a 30 °C	106
Tabela 19	Gradientes de temperatura (°C): 35 °C a 70 °C	106
Tabela 20	Gradientes máximos de temperatura (°C): 0 °C a 30 °C	107
Tabela 21	Gradientes máximos de temperatura (°C): 35 °C a 70 °C	107
Tabela 22	Não homogeneidade espacial de temperatura: 0 °C a 30 °C	107
Tabela 23	Não homogeneidade espacial de temperatura: 35 °C a 70 °C	108
Tabela 24	Gradientes de temperatura (°C): 0 °C a 30 °C	108

Tabela 25	Gradientes de temperatura (°C): 35 °C a 70 °C	108
Tabela 26	Coeficientes de sensibilidade de temperatura	110
Tabela 27	Coeficientes de sensibilidade de temperatura de ponto de orvalho	110
Tabela 28	Incertezas do higrômetro	111
Tabela 29	Incertezas combinadas e expandidas dos sistemas de medição (%ur)	111
Tabela 30	Desvios padrões de umidade relativa (%ur)	112
Tabela 31	Incertezas expandidas dos valores médios de umidade relativa de referência dos locais de medição (%ur)	112
Tabela 32	Gradientes de umidade relativa (%ur)	113
Tabela 33	Incertezas expandidas dos sistemas de medição de umidade relativa dos valores máximo e mínimo de umidade relativa	114
Tabela 34	Gradientes máximos de umidade relativa (%ur)	114
Tabela 35	Não homogeneidade espacial de umidade relativa	115
Tabela 36	Gradientes de umidade relativa	115
Tabela 37	Flutuações de temperatura (°C)	116
Tabela 38	Instabilidade temporal de temperatura (°C)	118
Tabela 39	Flutuações de temperatura (°C): 0 °C a 30 °C	118
Tabela 40	Flutuações de temperatura (°C): 35 °C a 70 °C	118
Tabela 41	Flutuações de umidade relativa (%ur)	119
Tabela 42	Instabilidade temporal de umidade relativa (%ur)	120
Tabela 43	Flutuações de umidade relativa (%ur)	120
Tabela 44	Desvio padrão da repetitividade de temperatura	121
Tabela 45	Incertezas associadas às temperaturas médias de referência do espaço de trabalho	122
Tabela 46	Apresentação dos resultados em °C (AFNOR)	123
Tabela 47	Incertezas combinadas e expandidas de temperatura (°C)	125
Tabela 48	Apresentação dos resultados em °C (DKD)	125
Tabela 49	Incertezas combinadas e expandidas de temperatura (°C)	127
Tabela 50	Apresentação dos resultados em °C (SEE)	128
Tabela 51	Incertezas associadas às temperaturas ajustadas na câmara (°C)	129

Tabela 52	Desvio Padrão da repetitividade de umidade relativa	130
Tabela 53	Incertezas associadas aos valores médios de umidade relativa de referência do espaço de trabalho (%ur)	131
Tabela 54	Apresentação dos resultados em %ur (AFNOR)	131
Tabela 55	Incertezas combinadas e expandidas de umidade relativa (%ur)	133
Tabela 56	Apresentação dos resultados em %ur (DKD)	133
Tabela 57	Incertezas combinadas e expandidas de umidade relativa (%ur)	135
Tabela 58	Apresentação dos resultados em %ur (SEE)	136
Tabela 59	Incertezas associadas aos valores de umidade relativa ajustados na câmara (%ur)	136
Tabela 60	Maior diferença de temperatura (°C): 0 °C a 30 °C	138
Tabela 61	Maior diferença de temperatura (°C): 35 °C a 70 °C	139
Tabela 62	Maior diferença de umidade relativa (%ur)	139
Tabela 63	Análise da temperatura de ponto de orvalho no centro do espaço de trabalho (°C)	140

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFNOR	Association Française de Normalisation
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
BPL	Boas Práticas de Laboratório
BSI	British Standards Institution
CBM	Comitê Brasileiro de Metrologia
CETIAT	Centre Technique des Industries Aerauliques et Thermiques
COFRAC	Comité Français d'Accréditation
DIELE	Divisão de Metrologia Elétrica do INMETRO
DIMCI	Diretoria de Metrologia Científica e Industrial do INMETRO
DITER	Divisão de Metrologia Térmica do INMETRO
DKD	Deutscher Kalibrierdienst
FIRJAN	Federação das Indústrias do Rio de Janeiro
GTM	Gestão da Tecnologia das Medições
IEC	International Electrotechnical Commission
ILAC	International Laboratory Accreditation Cooperation
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
IMC	Institute of Measurement and Control
ISA	Instrument Society of America
ISO	International Organization for Standardization
LAHIG	Laboratório de Higrometria do INMETRO
LATER	Laboratório de Termometria do INMETRO
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
NPL	National Physical Laboratory
NTC	Negative Temperature Coefficient
OECD	Organization for Economic Cooperation and Development
OHSAS	Occupational Health and Safety Assessment Series

PIB	Produto Interno Bruto
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
PTC	Positive Temperature Coefficient
RBC	Rede Brasileira de Calibração
SBM	Sociedade Brasileira de Metrologia
SEE	Society of Environmental Engineers
TIRP	Termômetro Industrial de Resistência de Platina
TPRP	Termômetro Padrão de Resistência de Platina
UEAF	Unidade Eletrocirúrgica de Alta Freqüência
UKAS	United Kingdom Accreditation Service
VIM	Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	18
1.1	APRESENTAÇÃO	18
1.2	OBJETIVOS	24
1.3	JUSTIFICATIVAS	24
1.4	METODOLOGIA DA PESQUISA	25
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	27
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	28
2.1	DOCUMENTOS TÉCNICOS REFERENTES À MEDIÇÃO DE TEMPERATURA E/OU UMIDADE EM CÂMARAS	28
2.1.1	Definições	30
2.1.2	Objetivos e condições de calibração/caracterização de câmaras	31
2.1.3	Programas e métodos de calibração/caracterização de câmaras	33
2.1.4	Fatores de influência	37
2.1.5	Efeito da carga na câmara	38
2.1.6	Quantidade e posicionamento dos sensores	39
2.1.7	Registro das medições	43
2.1.8	Efeito da velocidade do ar	44
2.1.9	Radiação no interior da câmara	44
2.1.10	Tipos de instrumentos	45
2.1.11	Incertezas relativas às variações no espaço e ao longo do tempo	46
2.1.12	Outras fontes e cálculo da incerteza expandida	50
2.1.13	Testes no ambiente da câmara	55
2.1.14	Verificação da câmara	56
2.1.15	Apresentação de resultados	57
2.2	HIGROMETRIA	58
2.2.1	Introdução	58
2.2.2	Termos e definições	59
2.2.2.1	Ar úmido	59
2.2.2.2	Temperatura de ponto de orvalho	60
2.2.2.3	Temperatura de ponto de congelação (<i>frost point temperature</i>)	60

2.2.2.4	Pressão parcial do vapor d'água	60
2.2.2.5	Pressão de saturação do vapor d'água	61
2.2.2.6	Temperatura de bulbo seco	62
2.2.2.7	Temperatura de bulbo úmido	62
2.2.2.8	Equação psicrométrica	62
2.2.2.9	Umidade relativa	63
2.2.2.10	Umidade absoluta	63
2.2.2.11	Razão da mistura ou razão de umidade	63
2.2.2.12	Umidade específica	63
2.2.3	Princípios de medição de umidade	64
2.2.3.1	Bulbo seco e bulbo úmido (psicrômetro)	64
2.2.3.2	Impedância elétrica	65
2.2.3.3	Condensação	66
2.3	TERMOMETRIA	68
2.3.1	Introdução	68
2.3.2	Princípios de medição de temperatura	68
2.3.2.1	Termometria de resistência	69
2.3.2.2	Termopar	71
2.4	GESTÃO	73
2.4.1	Gestão e metrologia	73
2.4.2	Sistemas de gestão	75
2.4.3	Sistemas de gestão para laboratórios de calibração e ensaio	77
3.	ANÁLISE EXPERIMENTAL	79
3.1	INTRODUÇÃO	79
3.2	INSTRUMENTOS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	81
3.2.1	Câmara climática	81
3.2.2	Higrômetro	82
3.2.3	Termômetros	82
3.2.4	Multímetro	83
3.3	VERIFICAÇÕES DOS INSTRUMENTOS	84
3.3.1	Higrômetro	84
3.3.1.1	Sistemas de amostragem	85
3.3.1.2	Execução das medições	85

3.3.1.3	Resultados	86
3.3.2	Termômetros	88
3.3.2.1	Execução das medições	88
3.3.2.2	Resultados	89
3.4	SISTEMA DE MEDIÇÃO	93
3.4.1	Definição do espaço de trabalho	93
3.4.2	Quantidade e posicionamento dos sensores	94
3.5	EXECUÇÃO DAS MEDIÇÕES	97
3.5.1	Pontos selecionados	97
3.5.2	Quantidade e intervalo entre medições	97
3.5.3	Automação dos instrumentos	99
3.5.4	Preparação do higrômetro	100
3.6	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	100
3.6.1	Valores médios de temperatura	100
3.6.2	Valores médios de umidade relativa	102
3.6.3	Variações de temperatura no espaço	103
3.6.3.1	Conforme a norma da AFNOR	103
3.6.3.2	Conforme o guia do DKD	107
3.6.3.3	Conforme o guia do SEE	108
3.6.4	Variações de umidade relativa no espaço	108
3.6.4.1	Conforme a norma da AFNOR	108
3.6.4.2	Conforme o guia do DKD	115
3.6.4.3	Conforme o guia do SEE	115
3.6.5	Variações de temperatura ao longo do tempo	115
3.6.5.1	Conforme a norma da AFNOR	115
3.6.5.2	Conforme o guia do DKD	117
3.6.5.3	Conforme o guia do SEE	118
3.6.6	Variações de umidade relativa ao longo do tempo	119
3.6.6.1	Conforme a norma da AFNOR	119
3.6.6.2	Conforme o guia do DKD	120
3.6.6.3	Conforme o guia do SEE	120
3.6.7	Incertezas expandidas de temperatura	121
3.6.7.1	Conforme a norma da AFNOR	121

3.6.7.2	Conforme o guia do DKD	123
3.6.7.3	Conforme o guia do SEE	126
3.6.8	Incertezas expandidas de umidade relativa	129
3.6.8.1	Conforme a norma da AFNOR	129
3.6.8.2	Conforme o guia do DKD	131
3.6.8.3	Conforme o guia do SEE	134
4.	CONSIDERAÇÕES	137
4.1	TERMOS E DEFINIÇÕES	137
4.2	ANÁLISE DAS MEDIÇÕES E DOS RESULTADOS	138
4.3	INSTRUMENTAÇÃO	141
4.4	ANÁLISE DOS DOCUMENTOS TÉCNICOS	142
5.	CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	146
5.1	CONCLUSÕES	146
5.2	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	147
	REFERÊNCIAS	148

1. INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

Em muitos casos, o desempenho ou a vida útil de um produto 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. Estes ensaios permitem identificar falhas e fraquezas do produto, o que possibilita aos fabricantes executarem alterações, visando a melhoria da qualidade, antes que este seja posto no mercado. Generalidades sobre ensaios climáticos são abordadas na norma NBR 5390 (ABNT, 1977). Contudo, várias outras normas definem como os ensaios climáticos devem ser executados para tipos específicos de produtos.

A simulação de condições climáticas também é empregada no processo de esterilização de equipamentos e materiais da área de saúde, a fim de prevenir infecção cruzada (JORGE, 2002); em pesquisas sobre os efeitos da temperatura e da umidade no corpo humano em diferentes condições do organismo (REVISTA DIVERSA, 2002); em pesquisas sobre conforto térmico (CHARLES, 2003); nos estudos de estabilidade de produtos farmacêuticos com substâncias medicamentosas (ANVISA, 2004); em sistemas de calibração de instrumentos de medição de temperatura e umidade de institutos nacionais de metrologia (FERNICOLA, 2002) e de laboratórios secundários (ACTIS, 1997) e em diversas outras atividades.

A simulação de condições ambientais pode ser executada através da utilização de câmaras. Existem câmaras de diversos tamanhos e dos mais variados tipos: câmaras de simulação de alta altitude, câmaras de vácuo, câmaras de choque térmico, câmaras de névoa, câmaras de atmosfera salina, etc. Contudo, esse estudo concentra-se em dois tipos de câmaras amplamente utilizadas: câmaras com controle de umidade e temperatura, conhecidas como câmaras climáticas, e câmaras com controle somente de temperatura, conhecidas como câmaras térmicas ou estufas.

As câmaras climáticas e as câmaras térmicas são utilizadas em diversos setores industriais (automotivo, químico, farmacêutico, alimentício, aeroespacial, eletrônico, etc.) e instituições de pesquisas (universidades, laboratórios, etc.). Nestes

equipamentos são ensaiados diversos tipos de produtos, como por exemplo, embalagens, componentes eletrônicos, produtos alimentícios, carros, dispositivos mecânicos, produtos farmacêuticos e outros. As figuras 1 a 4, a seguir, são exemplos de câmaras.



Figura 1 – Tipo de câmara
Fonte: <http://www.weissttechnik.co.uk>

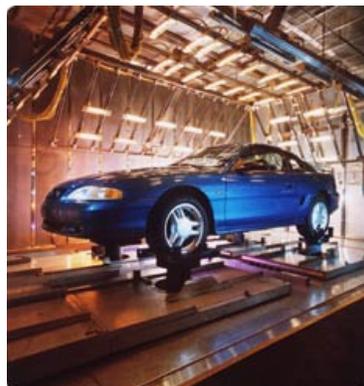


Figura 2 – Tipo de câmara
Fonte: <http://www.cszindustrial.com>



Figura 3 – Tipo de câmara
Fonte: <http://www.nbsc.com>



Figura 4 – Tipo de câmara
Fonte: <http://www.designenvironmental.co.uk>

Atualmente, existem muitos fabricantes de câmaras climáticas e câmaras térmicas, o que torna possível encontrar equipamentos com características distintas, como a faixa de medição, o tamanho, o método de medição, a forma de visualização do espaço interno, o sistema de ajuste, o tempo de estabilização, a taxa de aquecimento, a taxa de resfriamento, o erro máximo tolerado, etc.

Cada vez mais os clientes destes fabricantes vêm demandando por garantias mais extensas e contratos de manutenção do equipamento. Contudo, os fabricantes podem correr um alto risco se oferecerem aos seus clientes longas garantias e contratos de serviços de manutenção sem realizarem medições que sustentem o

desempenho garantido. A quantidade de horas gastas em medições que sustentem as especificações técnicas declaradas, podem causar impacto direto na satisfação ou insatisfação do cliente com relação ao produto, afetando assim a reputação do fabricante.

É de extrema importância que as medições realizadas nestes dispositivos sejam confiáveis, pois medições inadequadas podem levar a conclusões equivocadas sobre os ensaios realizados.

Sendo assim, a calibração de câmaras climáticas e câmaras térmicas torna-se fundamental para garantir a confiabilidade nos resultados de umidade e/ou temperatura das condições simuladas nestes dispositivos. Por meio da calibração é possível avaliar diversas características de operação e verificar se os resultados obtidos estão em conformidade com as especificações técnicas fornecidas pelo fabricante ou normas aplicáveis.

Calibração, diferentemente do que muitos pensam, não é o ajuste de um instrumento ou sistema de medição para ler corretamente; mas sim o processo de comparar, para o mesmo tipo de medição, o instrumento ou o sistema de medição contra uma referência, a fim de identificar erros nas leituras. Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia (INMETRO, 2003), calibração é um conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões.

Contudo, a melhor forma de assegurar a exatidão das medições é através da rastreabilidade. A rastreabilidade faz com que as medições realizadas por usuários em locais e momentos diferentes sejam consistentes. Assim, para garantir a rastreabilidade das medições, é fundamental que a calibração da câmara seja feita por meio de instrumentos cujas medições sejam rastreáveis aos padrões nacionais ou internacionais. Segundo o VIM (INMETRO, 2003), rastreabilidade é a propriedade do resultado de uma medição ou do valor de um padrão estar relacionado a referências estabelecidas, geralmente a padrões nacionais ou internacionais, através de uma cadeia contínua de comparações, todas tendo incertezas estabelecidas.

A calibração de instrumento ou sistema de medição é exigida em normas técnicas e em normas de sistemas de gestão que são amplamente utilizadas nas

indústrias e em institutos de pesquisas, como por exemplo, nas normas NBR ISO/IEC 17025 (ABNT, 2005), NBR ISO 9001 (ABNT, 2000) e NBR ISO 10012 (ABNT, 2004). A calibração também é requerida em regulamentos técnicos, como é o caso do regulamento técnico das boas práticas para a fabricação de medicamentos, publicado na resolução RDC 210 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA, 2003) que determina que todos os estabelecimentos fabricantes de medicamentos cumpram as diretrizes estabelecidas no regulamento.

Através da calibração da câmara é possível avaliar diversas características metrológicas, como variações de temperatura e/ou umidade no espaço de trabalho, variações de temperatura e/ou umidade ao longo do tempo, diferenças entre os valores indicados pela câmara e os valores de referência, incertezas das medições, efeito de uma determinada carga no espaço de trabalho e outras.

Na maioria dos casos, a execução da calibração e da verificação metrológica pelo próprio usuário é uma tarefa dificultada por diversos fatores, como por exemplo: falta de instrumentação adequada, falta de conhecimento sobre como efetuar as medições e os cálculos matemáticos dos dados obtidos e dificuldade em garantir a rastreabilidade das medições. Sendo assim, torna-se mais fácil contratar um laboratório que presta serviços metrológicos para a realização de tal tarefa.

No mercado de instituições prestadoras de serviços metrológicos, há vários laboratórios que são acreditados pelo organismo de acreditação local para certos serviços. A acreditação é de caráter voluntário e representa o reconhecimento formal da competência de um laboratório ou organização para desenvolver tarefas específicas, segundo requisitos estabelecidos. Uma das vantagens da acreditação é o aumento da confiança do público nos serviços prestados pela organização (INMETRO, 2005).

No Brasil, os laboratórios acreditados pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) constituem a Rede Brasileira de Calibração (RBC). No momento, há na RBC dois laboratórios acreditados para executar a calibração de estufas (à gravidade ou circulação forçada), porém não há nenhum laboratório para executar a calibração de câmaras climáticas. Já o INMETRO, instituto que tem como uma de suas atribuições a implantação e manutenção da cadeia de rastreabilidade dos padrões das unidades de medida no país, não oferece o serviço de calibração de câmaras.

Em alguns países, é possível que a calibração de câmaras seja realizada por laboratórios acreditados pelo organismo de acreditação local. Na França, por exemplo, há laboratórios acreditados pelo *Comité Français d'Accréditation* (COFRAC), comitê francês de acreditação de laboratórios, para prestarem serviços de calibração e verificação de câmaras e outros recintos climáticos. No Reino Unido e na Alemanha, também existem laboratórios acreditados pelo *United Kingdom Accreditation Service* (UKAS) e pelo *Deutscher Kalibrierdienst* (DKD), respectivos organismos de acreditação de laboratórios, para prestarem serviços de calibração de tais dispositivos.

A quantidade de documentos referentes à execução de medições de temperatura e/ou umidade em câmaras não é extensa. No âmbito da *International Electrotechnical Commission* (IEC), organização global que prepara e publica normas internacionais no campo da eletrotécnica, existem alguns documentos orientativos que estabelecem métodos para confirmar se o desempenho de câmaras climáticas e câmaras térmicas, com e sem carga, estão em conformidade com os limites especificados nos procedimentos de ensaios climáticos das normas da série IEC 60068-2 e de outras normas. Tais normas foram adotadas por organizações normativas de alguns países, como França, Inglaterra e Alemanha. No momento, está sendo elaborado pela IEC um documento que estabelece diretrizes para o cálculo da incerteza de medição de temperatura e umidade. O documento, desenvolvido por uma sociedade britânica denominada *Society of Environmental Engineers* (SEE), foi inicialmente apresentado ao comitê técnico da IEC como uma proposta de um novo trabalho.

Já no âmbito da *Association Française de Normalisation* (AFNOR), associação francesa de normalização, a norma NF X15-140 define e descreve os critérios para caracterização e verificação de câmaras climáticas e térmicas (AFNOR, 2002).

Na Alemanha, com o objetivo de dar o mesmo tratamento aos dispositivos a serem calibrados pelos vários laboratórios acreditados, foi publicado pelo DKD o guia DKD-R 5-7, intitulado *Kalibrierung von Klimaschränken*, sobre calibração de câmaras (DKD, 2004).

No Brasil, a falta de normas ou documentos orientativos que estabeleçam os requisitos mínimos para a calibração e/ou a execução de medições em câmaras faz com que estes dispositivos sejam utilizados sem serem avaliados ou então avaliados

inadequadamente. A falta de documentos sobre o assunto faz ainda com que não haja uma padronização das calibrações realizadas, tanto pelas próprias empresas quanto pelos laboratórios que prestam este tipo de serviço.

Segundo Reinshaus, Werner & Friederici (2004), a tarefa de verificar o desempenho de câmaras consiste das seguintes partes:

- calibração de todos os indicadores da câmara com seus respectivos sensores;
- verificação da conformidade com as especificações técnicas do fabricante;
- verificação da conformidade com os níveis de aceitação especificados pelo usuário;
- estimativa da incerteza de medição de todos os resultados;
- fornecimento de informações que permitam compreender o desempenho esperado da câmara durante sua utilização.

Reinshaus, Werner & Friederici (2004) resumem, ainda, a situação atual da seguinte forma:

- muitos métodos distintos são utilizados pelos fabricantes para determinar as especificações técnicas de seus produtos. Cada método é otimizado de acordo com as características particulares das câmaras;
- na maioria dos casos, rastreabilidade e reprodutibilidade dos resultados nas condições reais de utilização constituem um problema;
- métodos para estimar as incertezas das medições de temperatura ou umidade durante os ensaios e a verificação da especificação não estão disponíveis para câmaras, assim como, para os fatores de influência durante o uso;
- a variedade de câmaras disponíveis com dados técnicos (volume, princípios de operação, faixas e condições de trabalho) e campos de aplicação variados dificultam a definição de um procedimento geral de caracterização;
- pouco conhecimento do usuário leva a ignorar ou subestimar fatores importantes que influenciam o desempenho do equipamento. Por conseqüência, o resultado é a utilização em condições não otimizadas.

1.2 OBJETIVOS

Com base nas questões relatadas acima referentes à calibração de câmaras, o presente trabalho tem por finalidade a proposição dos seguintes objetivos:

- pesquisar, analisar e avaliar as diferenças existentes entre os documentos que tratam da calibração e/ou da realização de medições de temperatura e/ou umidade em câmaras;
- executar medições de temperatura e umidade em uma câmara climática e avaliar os resultados com base nos documentos que tratam da calibração e/ou da realização de medições de temperatura e/ou umidade em câmaras;
- conscientizar os proprietários de câmaras climáticas e câmaras térmicas que a calibração de tais dispositivos garante a confiabilidade nos resultados de umidade e/ou temperatura das condições simuladas, sustentando assim os resultados dos ensaios realizados.

1.3 JUSTIFICATIVAS

A idéia deste trabalho foi desenvolvida com base na experiência do autor que atua na área metrológica há vários anos, sempre atuando com higrimetria e termometria, e que por diversas vezes foi consultado por usuários de câmaras, dos mais diversos setores industriais, sobre a calibração e/ou a execução de medições nestes dispositivos.

As justificativas para a realização deste trabalho baseiam-se então nos seguintes pontos:

- necessidade de pesquisar e avaliar as diferenças existentes entre os documentos internacionais que se referem à calibração e/ou à execução de medições de temperatura e umidade em câmaras;
- falta de documentos no país que orientem e estabeleçam os requisitos mínimos para a calibração de câmaras;
- uniformização das calibrações de câmaras realizadas pelos laboratórios que oferecem este tipo de serviço;

- incentivo para que outros laboratórios metrológicos implantem e ofereçam o serviço de calibração de tais dispositivos;
- conscientização dos usuários de câmaras sobre a importância e a necessidade de medições confiáveis, uma vez que medições inadequadas podem interferir nas conclusões dos ensaios realizados nestes dispositivos.

1.4 METODOLOGIA DA PESQUISA

A metodologia de pesquisa adotada para o desenvolvimento deste trabalho foi do tipo exploratória, uma vez que a aquisição de maior conhecimento sobre a realização de medições de umidade e/ou temperatura em câmaras foi o objetivo primordial desta pesquisa.

Segundo Mattar (2005), a pesquisa exploratória pode ser utilizada para os seguintes objetivos:

- familiarizar e elevar o conhecimento e a compreensão de um problema de pesquisa em perspectiva;
- auxiliar a desenvolver a formulação mais precisa do problema de pesquisa;
- acumular *a priori* informações disponíveis relacionadas a um problema de pesquisa conclusiva a ser efetuada ou em andamento;
- ajudar no desenvolvimento ou criação de hipóteses explicativas de fatos a serem verificados numa pesquisa explicativa;
- ajudar no desenvolvimento ou criação de questões de pesquisa relevantes para o objetivo pretendido;
- auxiliar na determinação de variáveis relevantes a serem consideradas num problema de pesquisa;
- clarificar conceitos;
- ajudar no delineamento do projeto final de pesquisa;
- verificar se as pesquisas semelhantes já foram realizadas, quais os métodos utilizados e quais os resultados obtidos;
- estabelecer prioridades para futuras pesquisas.

Muitos dos objetivos da pesquisa exploratória descritos acima por Mattar (2005) são questões que permeiam por esta pesquisa, o que confirma este trabalho como sendo de cunho exploratório.

Os métodos empregados para a elaboração desta pesquisa compreenderam a pesquisa bibliográfica, a pesquisa documental e o estudo de caso.

A pesquisa bibliográfica foi desenvolvida a partir de várias fontes, tais como: normas nacionais e internacionais, guias técnicos, artigos científicos, revistas, anais de eventos, livros, etc. Cabe ressaltar que buscou-se utilizar fontes elaboradas por autores ou entidades que possuem credibilidade no assunto, como é o caso, por exemplo, do guia alemão DKD-R 5-7 (DKD, 2004) e do guia britânico *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003), ambos elaborados por grupos compostos por pesquisadores com experiência na área. Diversos endereços eletrônicos (internet) também foram consultados no decorrer da pesquisa.

A pesquisa documental foi desenvolvida através de documentos existentes no Laboratório de Higrometria do INMETRO, tais como: relatórios, procedimentos técnicos, resultados de testes, etc.

A fim de aplicar, avaliar e aprofundar muitos dos conhecimentos adquiridos quando da pesquisa exploratória, um estudo de caso foi realizado. O estudo de caso consistiu na execução de medições de temperatura e umidade em uma câmara climática e no tratamento matemático dos dados coletados, conforme os documentos técnicos utilizados nesta pesquisa. Foi utilizada para o estudo de caso, a câmara climática do Laboratório de Higrometria do INMETRO.

De acordo com Gil (1991), as principais vantagens do estudo de caso são: o estímulo a novas descobertas, uma vez que a flexibilidade do delineamento do estudo de caso deixa o pesquisador atento a novas descobertas ao longo do estudo; a ênfase na totalidade, visto que neste método o pesquisador volta-se para as várias dimensões de um problema; e a simplicidade dos procedimentos, pois os procedimentos de coleta e análise de dados são simples quando comparados com os exigidos por outros tipos de delineamentos.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, sendo este o capítulo 1, que foi dividido em cinco partes: apresentação, objetivos, justificativas, metodologia da pesquisa e estrutura do trabalho.

No capítulo 2, o referencial teórico da pesquisa será apresentado. O capítulo está dividido em quatro partes, onde na primeira parte são abordados os diversos aspectos dos documentos técnicos que tratam da medição de temperatura e/ou umidade em câmaras. Na segunda e na terceira parte, os temas higrometria e termometria são apresentados, respectivamente. A quarta parte do capítulo aborda o tema gestão.

No capítulo 3, a análise experimental da pesquisa será apresentada. O capítulo está dividido em seis partes, onde a primeira parte consiste de uma introdução. Na segunda parte, os instrumentos e equipamentos utilizados nesta pesquisa são apresentados. Na terceira parte, as verificações dos instrumentos são mostradas. A quarta e a quinta parte abordam, respectivamente, as características do sistema de medição e da execução das medições. Na sexta parte, os resultados experimentais são apresentados.

No capítulo 4, as considerações serão apresentadas. O capítulo está dividido em quatro partes, onde na primeira parte são feitas considerações sobre os termos e definições. Na segunda parte, uma análise das medições e dos resultados é apresentada. A terceira parte faz considerações sobre instrumentação. Já a quarta parte, faz análise dos documentos técnicos.

No capítulo 5, as conclusões serão apresentadas. O capítulo divide-se em duas partes, onde na primeira parte as conclusões são apresentadas e, na segunda parte, as propostas para trabalhos futuros são descritas.

A dissertação será concluída com as referências bibliográficas consultadas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão discutidos os seguintes assuntos: documentos técnicos referentes à medição de temperatura e/ou umidade em câmaras; higrometria, termometria e sistemas de gestão.

2.1. DOCUMENTOS TÉCNICOS REFERENTES À MEDIÇÃO DE TEMPERATURA E/OU UMIDADE EM CÂMARAS

A norma francesa NF X15-140 (AFNOR, 2002) tem como objetivo descrever os critérios para caracterizar e verificar uma câmara. A norma se aplica às câmaras com ou sem ventilação forçada de ar, projetadas para executar ensaios climáticos na pressão atmosférica. As câmaras podem ser ajustadas somente em temperatura ou em temperatura e umidade. Os métodos e princípios descritos na norma aplicam-se às seguintes faixas de temperatura de umidade relativa: -100 °C a 600 °C e 0 %ur a 100 %ur (na temperatura entre 0 °C e 100 °C). Segundo a norma, a caracterização de uma câmara consiste na avaliação das suas características de medição e a verificação é a comparação dos resultados obtidos durante a caracterização com as especificações da câmara.

Foi publicado na Alemanha no ano de 2004, pelo *Deutscher Kalibrierdienst* (DKD), o guia *Kalibrierung von Klimaschränken – DKD-R 5-7* referente à calibração de câmaras. O guia foi preparado pelo Comitê Técnico de Temperatura e Umidade do DKD em cooperação com o *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (PTB). O DKD é uma rede de laboratórios de calibração que são acreditados e supervisionados pelo Corpo de Acreditação do DKD, segundo critérios da norma ISO/IEC 17025, e o PTB é o instituto nacional de metrologia alemão que fornece serviços técnicos e científicos (PTB, 2005).

O guia DKD-R 5-7 (DKD, 2004) tem por finalidade dar o mesmo tratamento aos dispositivos a serem calibrados pelos laboratórios acreditados pelo DKD para prestarem este serviço. O guia formula os requisitos mínimos para calibração e estimativa da incerteza de medição na calibração de câmaras. As câmaras podem ser ajustadas somente em temperatura ou em temperatura e umidade. O guia também se aplica para a calibração de locais de medição individuais na câmara, não

estando então a câmara calibrada por completo. Dentro do escopo deste guia, a calibração pode ser conduzida com relação à temperatura e à umidade relativa do ar ou somente com relação à temperatura do ar.

No Reino Unido, o guia intitulado *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* foi preparado pelo Grupo Técnico Climático da sociedade *The Society of Environmental Engineers* (SEE). SEE, sociedade dos engenheiros ambientais, membro licenciado do Conselho de Engenharia do Reino Unido, é uma sociedade profissional que existe para promover a conscientização das questões relativas à engenharia ambiental e para fornecer aos membros da sociedade informações, treinamentos e representação dentro deste campo (SEE, 2005).

O guia britânico *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003) demonstra como calcular a incerteza das condições de temperatura e umidade de câmaras. Os métodos aplicam-se às câmaras com ajustes somente de temperatura ou com ajustes de temperatura e umidade. Segundo o guia, este também poder ser aplicado a recintos ambientais e até salas ou laboratórios.

Tanto a norma NF X15-140 (AFNOR, 2002) quanto os guias DKD-R 5-7 (DKD, 2004) e *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003) definem métodos para executar medições de temperatura e umidade na região de interesse do volume interno da câmara e procedimentos para determinar uma indicação quantitativa da qualidade do resultado de medição, isto é, a incerteza de medição. As medições permitem ainda que outros parâmetros metrológicos sejam determinados, como a correção e o erro sistemático.

Segundo o Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia – VIM (INMETRO, 2003), erro sistemático é a média que resultaria de um infinito número de medições do mesmo mensurando, efetuadas sob condições de repetitividade, menos o valor verdadeiro do mensurando; correção é o valor adicionado algebricamente ao resultado não corrigido de uma medição para compensar um erro sistemático; e incerteza de medição é um parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentadamente atribuídos a um mensurando.

Segundo o Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (ABNT & INMETRO, 2003), a incerteza do resultado de uma medição reflete a falta de conhecimento exato do valor do mensurando. A incerteza consiste de vários componentes que podem ser agrupados em duas categorias: avaliação do tipo A, aqueles que são avaliados pela análise estatística de séries de observações, e avaliação do tipo B, aqueles que são avaliados por outros meios que não a análise estatística de séries de observações. A incerteza padrão do resultado de uma medição, quando este resultado é obtido de valores de um número de outras grandezas, sendo igual à raiz quadrada positiva da soma de termos, é denominada incerteza padrão combinada. A incerteza expandida consiste na incerteza padrão combinada multiplicada por um fator de abrangência.

2.1.1 Definições

A norma francesa NF X15-140 (AFNOR, 2002) define câmara como sendo o espaço fechado no qual um ou mais parâmetros ambientais são controlados: câmara termostática, no caso de controle da temperatura do ar, e câmara climática, no caso de controle da temperatura e umidade do ar. O guia alemão DKD-R 5-7 (DKD, 2004) define câmara climática como sendo um dispositivo que permite que valores específicos de temperatura e/ou umidade sejam realizados em um volume fechado dentro de uma faixa de trabalho. Já o guia britânico *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003) define o termo recinto/câmara ambiental como sendo uma câmara ou um espaço fechado no qual a temperatura e/ou a umidade interna podem ser controladas dentro de limites específicos.

Tanto a norma francesa NF X15-140 (AFNOR, 2002) quanto o guia britânico *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003) utilizam o termo espaço de trabalho para a região de interesse dentro do volume interno da câmara conforme mostra, a seguir, a figura 5.

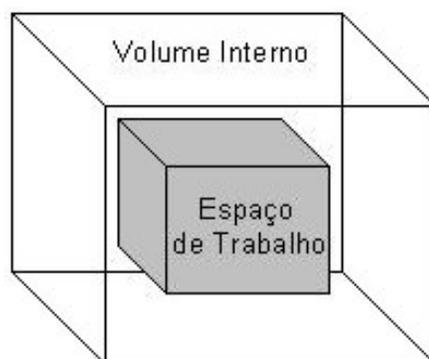


Figura 5 – Representação do espaço de trabalho no volume interno
Fonte: AFNOR, 2002

O guia alemão DKD-R 5-7 (DKD, 2004) utiliza o termo volume útil, que é definido como o volume parcial da câmara definido pelos locais de medição dos sensores utilizados na calibração. Segundo o guia, a razão entre a maior e a menor dimensão do volume útil deve ser menor do que cinco. Este guia define ainda local de medição como sendo a posição espacial na qual um sensor de temperatura ou umidade é posicionado no volume útil para calibração, e local de medição de referência como sendo a posição espacial no volume útil nas quais as diferenças entre a temperatura e a umidade do ar e os valores indicados são declaradas, geralmente é o centro do volume útil.

2.1.2 Objetivos e condições de calibração/caracterização de câmaras

Os objetivos da calibração de câmaras, segundo o guia DKD-R 5-7 (DKD, 2004), são os seguintes:

- calibração dos indicadores de temperatura e umidade relativa por comparação com os valores medidos no espaço útil através de instrumentos de referência;
- estimativa da incerteza na calibração de temperatura e umidade relativa e estimativa da incerteza para uso sob condições definidas;
- teste de conformidade com as tolerâncias definidas pelo usuário sob condições definidas e/ou especificações técnicas, se solicitado pelo cliente;
- calibração somente em locais de medição individuais, se solicitada pelo cliente.

Segundo o guia DKD-R 5-7 (DKD, 2004), as câmaras só podem ser calibradas se atenderem aos seguintes requisitos:

- disponibilidade de sensores de temperatura e umidade do ar com os devidos indicadores como componentes da câmara;
- disponibilidade de sistemas de controle das grandezas a serem calibradas como componentes da câmara;
- disponibilidade de especificações técnicas do fabricante;
- disponibilidade de documentos técnicos sobre os sensores, informações adicionais sobre, por exemplo, a especificação e a posição dos sensores, características do isolamento assim como a forma de estabilização da temperatura e de umedecimento é desejável;
- pressão atmosférica no espaço útil;
- para operação em uma faixa de temperatura ou umidade, a calibração precisa ser conduzida em pelo menos três pontos de temperatura ou umidade relativa. Calibração em apenas um ponto de temperatura ou umidade é admissível, mas limita o resultado da calibração a este ponto;
- se perda de calor ocorre no volume útil, esta contribuição deve ser determinada.

O guia faz ainda uma distinção entre câmaras com e sem circulação de ar no espaço de trabalho. Em ambos os casos, a câmara deve possuir sistema de aquecimento e/ou resfriamento.

Para o caso de câmaras com sistemas de circulação de ar:

- a faixa máxima da temperatura do ar se estende de $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Calibrações de umidade relativa são possíveis e aceitáveis apenas em faixas parciais adequadas;
- para volume útil menor do que 2000 litros, pelo menos nove locais de medição devem ser selecionados, de acordo com a norma IEC 60068-3-5 (IEC, 2001); para volume útil maior do que 2000 litros, os locais de medição devem formar uma treliça cúbica, onde o maior espaçamento entre locais de medição vizinhos é de 1 m;
- todo volume de ar deve ser circulado uma vez no período de 30 s.

No caso de câmaras sem sistemas de circulação de ar:

- a faixa máxima da temperatura do ar se estende de $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $350\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- o volume útil máximo é limitado a 2000 litros;
- as medições só podem ser executadas após as temperaturas em todos os locais de medição não apresentarem variações sistemáticas por pelo menos trinta minutos;
- o número de locais de medição no espaço para a calibração do volume útil deve estar de acordo com a norma IEC 60068-3-5 (IEC, 2001);
- o efeito da carga na homogeneidade espacial deve ser determinado por meio de medições no estado com carga e sem carga em pelo menos um local de medição utilizando uma carga que seja típica do usuário ou uma carga de teste;
- calibração de umidade relativa não é admissível;
- carga com dissipação de calor não é admissível.

O objetivo do procedimento de caracterização da câmara, segundo a norma francesa NF X15-140 (AFNOR, 2002), é estabelecer e/ou intermitentemente garantir o desempenho real da câmara na ausência de amostras ou com amostras definidas.

De acordo com a norma NF X15-140 (AFNOR, 2002), a caracterização deve ser conduzida sob condições ambientais que são compatíveis com a operação do dispositivo. Exceto para o caso de simulações específicas, a caracterização deve ser conduzida nas condições ambientais recomendadas pela norma NF EN 60068-1 (AFNOR, 1995), isto é: temperatura de 15 °C a 35 °C, umidade relativa de 25 %ur a 75 %ur e pressão atmosférica de 860 hPa a 1060 hPa.

2.1.3 Programas e métodos de calibração/caracterização de câmaras

O programa de caracterização da câmara, segundo a norma NF X15-140 (AFNOR, 2002), pode ser executado para uso específico ou não específico, com ou sem amostras. No caso de uso específico, o programa aplicado deve garantir o desempenho da câmara em condições específicas. No caso de uso não específico, o programa deve assegurar que características específicas sejam respeitadas para toda faixa de utilização. No caso de câmara termostática, o programa para uso não específico deve conter no mínimo dois pontos de temperatura localizados nos extremos da faixa de uso e um ponto intermediário; no caso de câmara climática,

aplica-se o programa para câmara termostática adicionando-se três pontos de umidade relativa a cada uma das temperaturas, totalizando assim nove pontos de umidade relativa.

O programa de caracterização da norma NF X15-140 (AFNOR, 2002) prevê medições do desempenho da câmara em duas situações: no ambiente atingido, estado em que as diferenças entre os valores em cada ponto do espaço de trabalho e o ponto de ajuste ambiental são estáveis; e no ambiente transitório, quaisquer estados exceto o ambiente atingido. No caso do ambiente atingido, exceto para acordos específicos, o programa mínimo de caracterização é baseado nos seguintes parâmetros: gradiente, flutuação, desvio do ponto de ajuste e erro de indicação; porém outros parâmetros podem ser caracterizados, como por exemplo, o tempo de recuperação (temperatura e umidade relativa), a velocidade do ar e o efeito da radiação das paredes. No caso do ambiente transitório, exceto para acordos específicos, o programa mínimo de caracterização é baseado nos seguintes parâmetros: taxa de mudança da temperatura, *overshoot* (diferença entre o valor extremo determinado no ambiente transitório e o valor determinado em resposta a uma escala específica da faixa de medição) e parâmetros para operação em um ambiente atingido; porém outros parâmetros podem ser caracterizados se acordado entre as partes.

O programa de calibração do guia britânico *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003), no caso de temperatura (sistema de umedecimento desligado), deve incluir: a temperatura mais alta, a temperatura mais baixa, pelo menos dois pontos de temperatura com o sistema de resfriamento ligado e pelo menos dois pontos de temperatura com o sistema de aquecimento ligado. No caso de temperatura e umidade, medições devem ser realizadas com os sistemas de umedecimento e desumidificação ligados, em complemento ao programa de temperatura, para pelo menos dois valores de umidade, cobrindo a faixa, para quaisquer das condições de temperatura onde umidade esteja sendo executada. O guia descreve que a realização de muitas condições se faz necessária pois os sistemas de controle de temperatura e umidade podem causar diferentes gradientes e flutuações na câmara. Contudo, se a câmara é utilizada apenas em alguns pontos específicos, então apenas estes precisam ser avaliados.

Três métodos de calibração de câmaras são descritos no guia alemão DKD-R 5-7 (DKD, 2004), são eles:

(A) Calibração de um volume útil sem carga, onde a calibração abrange:

- a determinação da correção da indicação ou a diferença entre o local de medição de referência e a indicação;
- a determinação da não homogeneidade espacial no volume útil vazio;
- a determinação da instabilidade temporal no volume útil vazio;
- a determinação do efeito da radiação;
- a determinação do efeito da carga no local de medição pela comparação do volume útil com e sem carga, se solicitado pelo cliente.

(B) Calibração de um volume útil com carga, onde o carregamento pode ser feito de acordo com uma aplicação típica do usuário ou pelo preenchimento de pelo menos 40% do volume útil com corpos de ensaios. A influência do efeito da carga é determinada através de uma medição adicional em um local de medição central no espaço vazio. A calibração abrange então:

- a determinação da correção da indicação ou a diferença entre o local de medição de referência e a indicação no estado com carga;
- a determinação da não homogeneidade espacial no volume útil carregado;
- a determinação da instabilidade temporal no volume útil carregado;
- a determinação do efeito da radiação;
- a determinação da influência do carregamento no local de medição de referência pela comparação do volume útil com e sem carga.

(C) Calibração de locais de medição individuais que não formam um volume útil. A calibração abrange:

- a determinação da correção da indicação ou a diferença entre o local de medição e a indicação;
- a determinação da instabilidade temporal no local de medição;
- a determinação do efeito da radiação no local de medição;

- a determinação da influência do carregamento no local de medição pela comparação do volume útil com e sem carga, se solicitado pelo cliente.

Já o guia britânico *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003) descreve três métodos para determinar condições em uma câmara: vazia, carregada representativamente e durante as condições de uso. O guia descreve as vantagens e desvantagens de cada método:

1) Câmara vazia

As vantagens do método são:

- custo relativamente baixo;
- o espaço de trabalho é calibrado por inteiro;
- a calibração só precisa ser feita uma ou duas vezes ao ano;
- não necessita de nova calibração quando a amostra é alterada;
- a adequação da câmara pode ser avaliada sem submeter a amostra ao condicionamento.

As desvantagens do método são:

- o efeito da amostra é difícil de se quantificar, embora possa ser desprezível para amostras que são pequenas quando comparadas com a câmara;
- o efeito da amostra que dissipa calor é muito difícil de se quantificar;
- a deriva, a resolução e a repetitividade do controlador da câmara devem ser avaliados e suas contribuições devem ser incluídas no cálculo de incerteza.

2) Câmara com carga representativa

As vantagens do método são:

- custo relativamente baixo;
- o efeito da carga no controle da câmara pode ser avaliado sem submeter a amostra a um estresse desconhecido;
- o menor espaço da câmara que produz condições satisfatórias pode ser escolhido antes do ensaio;

- o posicionamento adequado dos sensores pode fornecer informações detalhadas sobre partes críticas da carga;
- anomalias provocadas pela dissipação da carga podem ser quantificadas.

As desvantagens do método são:

- nova calibração é requerida quando a amostra é alterada significativamente;
- a deriva, a resolução e a repetitividade do controlador da câmara devem ser avaliados e suas contribuições devem ser incluídas no cálculo de incerteza.

3) Medição das condições na câmara durante o uso

As vantagens do método são:

- melhor estimativa das condições experimentadas pelo item sob teste;
- o efeito da carga no controle da câmara pode ser avaliado;
- a deriva da câmara não precisa ser avaliada;
- o posicionamento adequado dos sensores pode fornecer informações detalhadas sobre partes críticas da carga;
- anomalias provocadas pela dissipação da carga podem ser quantificadas;
- método pode ser econômico pois a câmara não é calibrada para situações que não são necessárias.

As desvantagens do método são:

- equipamento de medição é requerido para todo ensaio;
- cálculo de incerteza deve ser executado para todo ensaio;
- pode ser o método mais caro pois os equipamentos de medição são requeridos todo o tempo.

2.1.4 Fatores de influência

De acordo com a norma NF X15-140 (AFNOR, 2002), há determinados fatores que podem influenciar no desempenho da câmara, tais como: poluição de qualquer natureza; luz solar; vibrações acústicas; variações na tensão e na

freqüência da alimentação elétrica; qualidade, vazão e temperatura da água refrigerante; e outros.

Por sua vez, a câmara também pode influenciar nas amostras submetidas no seu interior. A norma NF X15-140 (AFNOR, 2002) descreve certas perturbações que são geradas ou transmitidas pela câmara que podem afetar os ensaios e as amostras, tais como: vibrações mecânicas, poluição, congelação ou condensação, corrosão, renovação de ar, não uniformidade na distribuição do vapor d'água, radiação das paredes, e outras.

Assim como a câmara influencia nas amostras postas no seu interior, estas também influenciam no ambiente interno da câmara. Como consequência, segundo a norma NF X15-140 (AFNOR, 2002), os seguintes parâmetros devem ser levados em consideração: a massa, a natureza, a forma e as dimensões das amostras; a influência das amostras na circulação de ar na câmara; a capacidade de emitir ou absorver vapor d'água; a dissipação de radiação térmica; o risco de poluição da atmosfera da câmara; a vibração; as perturbações eletromagnéticas; e outros.

2.1.5 Efeito da carga na câmara

As câmaras são geralmente calibradas sem carga (vazias). Contudo, todos os documentos sobre medições em câmara prevêm a avaliação do efeito da carga no seu interior. Este efeito é ainda mais predominante em câmaras sem circulação forçada de ar. A avaliação do efeito da carga é oportuna quando o usuário opera com cargas similares em um mesmo arranjo. A carga deve estar descrita no certificado de calibração e que os resultados declarados são válidos somente para aquelas condições. Segundo o guia DKD-R 5-7 (DKD, 2004), o efeito da carga é avaliado através da calibração da câmara, pelo menos para o local de medição de referência, com e sem carga, e a diferença máxima é tomada como contribuição de incerteza. A avaliação do efeito da carga pode ser feita com uma carga específica do cliente ou com uma carga de teste que deve ocupar pelo menos 40% do volume útil. No caso de carga com dissipação de energia, a energia total dissipada dentro do volume da câmara não deve exceder a 10% da energia necessária para o controle de temperatura. O efeito da energia dissipada pela carga deve ser avaliado através da diferença entre as medições executadas com e sem dissipação de energia.

A norma IEC60068-3-7 (IEC, 2001) descreve um método para confirmar se as câmaras estão em conformidade com os requisitos especificados nos procedimentos de testes climáticos das normas IEC 60068-2-1 (IEC, 1990) e IEC 60068-2-2 (IEC, 1974) quando carregadas com carga que dissipa energia ou não. A confirmação do desempenho da câmara pode ser feita ainda com carga artificial, que dissipa energia ou não, de acordo com características construtivas definidas. Cabe ressaltar que esta não é uma norma de calibração, mas sim de verificação de que todos os valores estão dentro dos limites especificados na série de normas IEC 60068-2.

2.1.6 Quantidade e posicionamento dos sensores

No que tange ao posicionamento dos sensores, a norma NF X15-140 (AFNOR, 2002) estipula que, no caso de caracterização da câmara sem amostra, os sensores de temperatura devem ser postos em distâncias iguais das paredes da câmara em 1/10 de cada uma das dimensões do volume interno (largura, altura e profundidade). Para volume de 2 m³ ou menor, utiliza-se nove sensores de temperatura, um em cada extremidade e um no centro do espaço de trabalho, conforme mostra a figura 6 a seguir. Para volume maior do que 2 m³ e menor ou igual a 20 m³, utiliza-se nove sensores de temperatura, conforme configuração anterior, e mais seis sensores de temperatura distribuídos nos centros das áreas que formam o espaço de trabalho, conforme mostra a figura 7 a seguir. Para outros volumes, o número e o posicionamento dos sensores de temperatura devem ser acordados entre as partes.

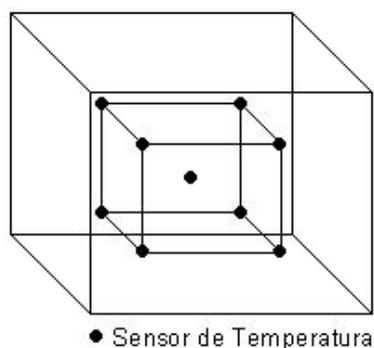


Figura 6 – Posicionamento dos sensores de temperatura para volumes de 2 m³ ou menores
Fonte: AFNOR, 2002

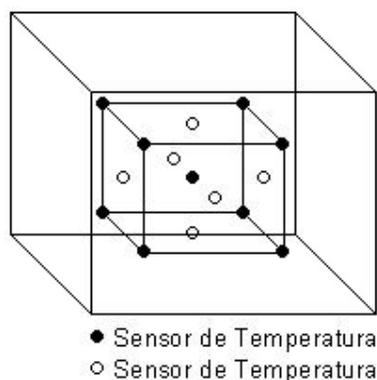


Figura 7 – Posicionamento dos sensores de temperatura para volumes maiores do que 2 m^3 e menores ou iguais a 20 m^3
Fonte: AFNOR, 2002

No caso de caracterização da câmara com amostra, a norma NF X15-140 (AFNOR, 2002) estipula que, para amostra que não dissipa calor, as posições definidas no caso da caracterização sem amostra são utilizadas, porém os sensores de temperatura devem ser postos a mais de 50 mm da amostra. Na impossibilidade de posicionar um sensor no centro do espaço de trabalho, este deve ser posto a 50 mm da amostra e exposto à chegada do fluxo de ar. Para amostra que dissipa calor, os sensores de temperatura devem ser posicionados de forma que não sejam perturbados pela dissipação da amostra. Neste caso, o posicionamento dos sensores deve ser acordado entre as partes.

No caso da instalação dos sensores de umidade, a norma NF X15-140 (AFNOR, 2002) define que, tanto no caso da caracterização da câmara sem amostra quanto na caracterização com amostra, as regras descritas para os sensores de temperatura são aplicáveis. A norma observa que a temperatura de ponto de orvalho é considerada uniforme dentro do volume da câmara, o que possibilita que um único sensor de temperatura de ponto de orvalho seja utilizado no espaço de trabalho. A norma observa ainda que, quando da utilização de higrômetros que medem umidade relativa, para otimizar o resultado final, a mesma quantidade de sensores de umidade relativa e temperatura deve ser utilizada e os sensores de umidade devem ser posicionados próximos aos sensores de temperatura.

Com relação à arrumação dos locais de medição, o guia alemão DKD-R 5-7 (DKD, 2004) estabelece que, no caso de calibração do volume útil pelo método (A) ou (B), para volumes de até 2000 L, o número e a posição espacial dos pontos de medição devem estar de acordo com a DIN EN 60068 (equivalente à IEC 60068), isto é, arestas e centro do cubo que compõem o volume útil. Para volumes úteis

maiores, os locais de medição devem ser arrumados no volume útil na forma de uma treliça cúbica onde o espaçamento máximo dos locais de medição adjacentes é de 1 m. No caso de calibração pelo método (C), os locais de medição são definidos pelo cliente. No caso da calibração da câmara em umidade relativa, determina-se a temperatura de ponto de orvalho no centro do volume útil e calcula-se a distribuição espacial de umidade relativa através da distribuição da temperatura do ar. Alternativamente, a distribuição de umidade no volume útil pode ser determinada através de medições de umidade relativa em analogia à determinação da distribuição de temperatura.

O guia *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003) define que, para câmara vazia, normalmente oito sensores de temperatura são utilizados nas extremidades do espaço de trabalho e um no centro. Contudo, para câmaras maiores, mais sensores de temperatura podem ser necessários. No caso de carga, ou de item sob teste, oito sensores de temperatura distribuídos nas extremidades são geralmente utilizados. Para pequenos itens sob teste, poucos sensores de temperatura podem ser suficientes, porém pelo menos quatro devem ser usados. Para objetos maiores, sensores de temperatura extras podem ser utilizados conforme apropriado. Para o caso de item sob teste que dissipa calor, a medição da temperatura do ar incidente é geralmente considerada a condição de interesse, mas os outros sensores de temperatura ainda devem ser usados de modo que os efeitos do calor do item ensaiado possam ser quantificados. Para medição da umidade, o higrômetro deve ser posicionado no centro da câmara vazia ou no ar incidente ao lado do item sob teste. De acordo com o guia, a pressão parcial do vapor d'água é assumida como a mesma em qualquer lugar da câmara.

A norma IEC 60068-3-5 (IEC, 2001), que tem por objetivo descrever um método para confirmar o desempenho de câmaras térmicas sem a utilização de carga, define que no mínimo nove sensores devem ser utilizados, um em cada extremidade do espaço de trabalho e um centro. Contudo, para câmaras acima de 2000 L, sensores adicionais devem ser postos no centro de cada plano que compõe o espaço de trabalho, resultando assim em um mínimo de quinze sensores. Para câmara com volume interno de até 1000 L, a distância do sensor às paredes da câmara é de um décimo de cada uma das dimensões do volume interno (largura, altura e profundidade), porém nenhuma distância deve ser menor do que 50 mm.

Para câmara com volume interno de 1000 até 2000 L, a distância do sensor às paredes da câmara é de um décimo de cada uma das dimensões do volume interno (largura, altura e profundidade), porém nenhuma distância deve ser menor do que 100 mm. Para câmara com volume interno maior do que 2000 L, a distância do sensor às paredes da câmara é de um décimo de cada uma das dimensões do volume interno (largura, altura e profundidade), porém nenhuma distância deve ser menor do que 150 mm.

A norma IEC 60068-3-6 (IEC, 2001), que tem por finalidade descrever um método para confirmar o desempenho de câmaras climáticas sem a utilização de carga, define que o perfil de temperatura da câmara deve ser determinado de acordo com a norma IEC 60068-3-5 (IEC, 2001). Já a umidade é medida através de um único sensor localizado no centro do espaço de trabalho e a umidade relativa é calculada para cada ponto do espaço de trabalho que possui um sensor de temperatura. Com isso, supõe-se que a umidade absoluta é constante em todo espaço de trabalho.

A respeito da medição de umidade em câmaras, tanto as normas NF X15-140 (AFNOR, 2002) e IEC 60068-3-6 (IEC, 2001) quanto os guias DKD-R 5-7 (DKD, 2004) e *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003) consideram que a umidade absoluta no interior da câmara é constante, com isso um único sensor pode ser utilizado para executar a medição deste parâmetro. Já umidade relativa, que é altamente dependente da temperatura, não é constante no interior da câmara devido a não uniformidade da temperatura. Sendo assim, a distribuição espacial de umidade relativa é determinada através da distribuição da temperatura. O guia alemão DKD-R 5-7 (DKD, 2004) observa que esta consideração não é válida se houver fontes de vapor d'água no volume útil, se a eficácia da mistura entre vapor d'água e ar seco não for garantida, ou se houver fendas que possibilitem a troca de ar com o ambiente. Segundo o guia *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003), como a variação da umidade absoluta no interior da câmara é normalmente pequena, esta só precisa então ser avaliada ocasionalmente.

2.1.7 Registro das medições

As medições dos sensores, tanto de temperatura quanto de umidade, segundo a norma NF X15-140 (AFNOR, 2002), devem ser registradas no máximo a cada um minuto. Após a estabilização, no mínimo trinta medições devem ser registradas por sensor e o período mínimo de medições é de trinta minutos. O guia DKD-R 5-7 (DKD, 2004) estabelece que, após a estabilização, pelo menos trinta medições, tanto de temperatura quanto de umidade, devem ser registradas durante trinta minutos em um intervalo de tempo mais ou menos constante. Para o guia *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003), após a estabilização, pelo menos cinco e preferencialmente vinte ou mais medições devem ser registradas para cada sensor. Contudo, trinta minutos são normalmente suficientes.

A grande quantidade de medições, o curto intervalo de tempo entre estas e a necessidade de que as leituras sejam feitas simultaneamente dificultam a aquisição manual das medidas. Desta forma, a aquisição automática das medições se faz necessária. Uma possibilidade é a utilização de instrumentos, usualmente chamados de *data loggers* (figuras 8 e 9), que têm capacidade de armazenar dados na própria memória ao longo de dias ou meses. Tanto a programação quanto à coleta dos dados armazenados é normalmente executada através de um *software* que é fornecido juntamente com o instrumento. A programação permite configurar o horário e a data de início, o intervalo entre as medições e outros parâmetros.

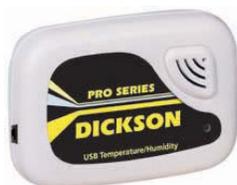


Figura 8 – Registrador (*data logger*)
Fonte: <http://www.dicksonweb.com>



Figura 9 – Registrador (*data logger*)
Fonte: <http://www.veriteq.com>

Uma outra forma de fazer a aquisição automática das medições é através do interfaceamento dos instrumentos com um computador por meio de protocolos de medição, como por exemplo, RS-232, IEEE-488, etc. Bojkovski et al. (2002) apresentaram um sistema automatizado para a execução de medições de temperatura e umidade em câmaras climáticas composto por um computador, um

scanner automático, um multímetro, um higrômetro de ponto de orvalho e sensores de temperatura (termopares e sensores de resistência). O sistema desenvolvido pode ser utilizado para a calibração de câmaras no próprio no laboratório ou nas instalações do cliente. Segundo esses autores, os objetivos para a automação de tais sistemas são: confiabilidade das medições, repetitividade, consistência, redução das fontes que causam erros de medição, redução do trabalho humano e otimização do tempo de calibração.

2.1.8 Efeito da velocidade do ar

Com relação à medição da velocidade do ar no interior da câmara, tanto o guia alemão DKD-R 5-7 (DKD, 2004) quanto o guia britânico *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003) não fazem referência sobre a medição deste parâmetro. Já a norma francesa NF X15-140 (AFNOR, 2002) descreve que a determinação da velocidade do ar no espaço de trabalho, na ausência de amostra, é de uso somente indicativo. As velocidades máxima e mínima devem ser determinadas para cada temperatura e as medições devem ser realizadas em cada ponto de medição do espaço de trabalho.

2.1.9 Radiação no interior da câmara

Todos os corpos emitem ondas eletromagnéticas, ou radiação, dependendo da sua temperatura. Desta forma, a radiação emitida pelas paredes internas da câmara pode, em muitos casos, afetar a temperatura do ar. Geralmente, este efeito não é considerado na calibração de câmaras. A norma NF X15-140 (AFNOR, 2002) descreve que o efeito da radiação das paredes deve ser avaliado segundo a norma NF EN 27726 (AFNOR, 1994). Já o guia DKD-R 5-7 (DKD, 2004) sugere quatro métodos pelos quais o efeito da radiação pode ser estimado. No primeiro método, o efeito da radiação é determinado através da diferença entre um termômetro de alta emissividade ($\epsilon > 0,6$) e um de baixa emissividade ($\epsilon < 0,15$), ambos posicionados no centro da câmara. No segundo método, o efeito da radiação é determinado através da diferença entre as medições feitas com um termômetro com e sem proteção à radiação. Já no terceiro método, o efeito da radiação é obtido por meio da diferença entre a medição da temperatura da parede e a medição da temperatura

do ar com um termômetro de baixa emissividade ou com proteção à radiação. Para o quarto método, o efeito da radiação não precisa ser metrologicamente determinado para temperaturas de 0 °C a 50 °C e uma contribuição máxima de 0,3 K na incerteza de medição pode ser assumida.

Friederici & Tegeler (2004) avaliaram o efeito da radiação em três tipos distintos de câmaras climáticas e, em uma temperatura de 185 °C, diferença de até 2,3 K foi encontrada para termômetros de diferentes emissividades. Segundo os autores, a concordância entre a temperatura do ar e a temperatura da parede interna da câmara é um critério importante na qualidade da câmara. A concordância entre estas duas temperaturas pode ser melhorada através da colocação de uma parede de fluxo de ar em todos os lados.

2.1.10 Tipos de instrumentos

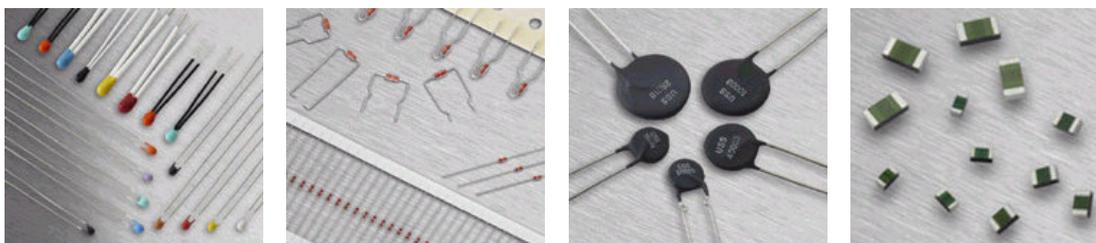
Diversos tipos de instrumentos podem ser utilizados para executar medições no interior da câmara. De acordo com a norma francesa NF X15-140 (AFNOR, 2002), para realizar medições de temperatura, os tipos de sensores mais utilizados são: termômetros de resistência de platina, onde o mais utilizado é do tipo 100 Ω a 0 °C, e termopares, onde os mais utilizados são do tipo T, do tipo J e do tipo K. Para realizar medições de umidade, os tipos de sensores mais utilizados são: higrômetro à condensação (higrômetro óptico), psicrômetro e higrômetro à variação de impedância (capacitivo ou resistivo). O efeito da radiação das paredes deve ser medido por meio de termômetro globo e a velocidade do ar no interior da câmara pode ser medida com um sensor para todas as direções ou com qualquer outro tipo de sensor.

O guia DKD-R 5-7 (DKD, 2004) não descreve que tipos de sensores devem ser utilizados para executar medições de temperatura e umidade na câmara. Já o guia *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003) descreve, somente para o caso de medição de umidade, os tipos de sensores que são normalmente utilizados, são eles: higrômetro à condensação, psicrômetro e higrômetro de umidade relativa.

Tanto a norma NF X15-140 (AFNOR, 2002) quanto os guias DKD-R 5-7 (DKD, 2004) e *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003) estabelecem que todos os sistemas de

medição utilizados para a realização de medições na câmara devem estar devidamente calibrados.

A utilização de termistores (figuras 10 a 13) para avaliar temperatura em câmara climática foi proposta por Nielsen & Barendregt (2004). Termistores são resistores cerâmicos semicondutores construídos a partir de óxidos metálicos distintos. Os termistores estão divididos em dois grupos: os do tipo *PTC* (*Positive Temperature Coefficient*), que são sensores termo-resistivos cuja resistência elétrica aumenta com a elevação da temperatura, e os do tipo *NTC* (*Negative Temperature Coefficient*), que são sensores termo-resistivos cuja resistência elétrica diminui com a elevação da temperatura. Os termistores possuem uma alta sensibilidade e operam geralmente na faixa de $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, embora alguns tipos possam atingir temperaturas tão baixas quanto à do hélio líquido ($\cong -270,0\text{ }^{\circ}\text{C}$) e tão altas quanto $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nielsen & Barendregt (2004) avaliaram termistores do tipo NTC de série A (encapsulamento de vidro) e de série B (revestimento de epóxi) com relação aos seguintes aspectos: auto-aquecimento, linearidade, estabilidade a longo prazo e o efeito da alta temperatura e da umidade. Os resultados obtidos mostraram que os termistores da série A são adequados para serem utilizados como sensores de referência em câmaras climáticas.



Figuras 10 a 13 – Tipos de termistores
Fonte: <http://www.ussensor.com>

2.1.11 Incertezas relativas às variações no espaço e ao longo do tempo

As medições de temperatura e umidade executadas na região de interesse do volume interno da câmara possibilitam determinar diversos parâmetros metrológicos, como por exemplo, as variações das medições no espaço e ao longo do tempo.

Um parâmetro de grande relevância a ser determinado na região de interesse no interior da câmara refere-se as variações de temperatura que ocorrem de um lugar para o outro; ou seja, algumas regiões são mais quentes ou mais frias do que

outras. Como a umidade relativa é dependente da temperatura, então as variações de umidade relativa na região de interesse estão diretamente relacionadas com as variações de temperatura. Segundo a norma francesa NF X15-140 (AFNOR, 2002), a diferença máxima obtida em um ambiente estável entre os valores médios das medições acrescidos das incertezas expandidas denomina-se gradiente. Já a diferença máxima obtida em um ambiente estável entre os valores máximo e mínimo acrescidos das incertezas expandidas dos sensores denomina-se gradiente máximo. Os gradientes são calculados através das seguintes equações:

$$\text{Gradiente de temperatura:} \quad H\theta = \max(\theta_{mj} + U_{mj}) - \min(\theta_{mj} - U_{mj}) \quad (1)$$

$$\text{Gradiente máximo de temperatura:} \quad H\theta_M = \max(\theta_{ji} + U_{cj}) - \min(\theta_{ji} - U_{cj}) \quad (2)$$

$$\text{Gradiente de umidade relativa:} \quad HU_w = \max(U_{wmj} + U_{mj}) - \min(U_{wmj} - U_{mj}) \quad (3)$$

$$\text{Gradiente máximo de umidade relativa:} \quad HU_{wM} = \max(U_{wji} + U_{cj}) - \min(U_{wji} - U_{cj}) \quad (4)$$

Onde,

θ_{mj} – Temperatura média por sensor

U_{mj} – Incerteza expandida associada ao valor médio do parâmetro

θ_{ji} – Temperatura do sensor j medido no instante i

U_{cj} – Incerteza expandida do sensor j do sistema de medição

U_{wmj} – Umidade relativa média por sensor

U_{wji} – Umidade relativa do sensor j medido no instante i

Para o guia alemão DKD-R 5-7 (DKD, 2004), a maior diferença de umidade relativa e/ou temperatura entre um local de medição e o local de referência, geralmente o centro do volume útil, é denominada não homogeneidade espacial. A não homogeneidade espacial deve ser avaliada em todos os pontos de calibração para os métodos de calibração (A) e (B), tanto no caso de temperatura quanto umidade relativa. No caso de calibração da câmara em temperatura de acordo com o método (C), a não homogeneidade local deve ser avaliada para cada local de medição através da utilização de um termômetro posicionado de 2 a 5 cm do sensor de temperatura do local de medição. A não homogeneidade espacial é equivalente a meia largura de uma distribuição de probabilidade retangular. As equações para calcular as incertezas referentes à não homogeneidade espacial são as seguintes:

$$u(\delta T_{inhom}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \max |T_{ref} - T_i| \quad (5)$$

$$u(\delta h_{inhom}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \max |h_{ref} - h_i| \quad (6)$$

Onde,

$u(\delta T_{inhom})$ – Incerteza padrão devido à não homogeneidade espacial de temperatura

$u(\delta h_{inhom})$ – Incerteza padrão devido à não homogeneidade espacial de umidade relativa

T_{ref} – Temperatura do local de referência

T_i – Valor medido de temperatura para o local de medição i

h_{ref} – Umidade relativa do local de referência

h_i – Valor medido de umidade relativa para o local de medição i

Para o guia *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003), as variações no espaço para a grandeza medida são chamadas de gradientes. Para cada instante de medição, tanto de temperatura quanto de umidade relativa, calcula-se a média e o desvio padrão dos sensores, o maior valor de desvio padrão é assumido como gradiente. Como o gradiente é o desvio padrão de repetidas medições, logo esta fonte de incerteza é computada no cálculo de incerteza da câmara como tendo distribuição normal.

Um outro importante parâmetro a ser determinado na região de interesse no interior da câmara refere-se as variações de temperatura que ocorrem ao longo do tempo. Assim como no caso anterior, as variações de umidade relativa também estão diretamente relacionadas com as variações de temperatura. De acordo com a norma NF X15-140 (AFNOR, 2002), a diferença entre os valores máximo e mínimo medidos por um sensor do espaço de trabalho sob condições estáveis durante o período de medição denomina-se flutuação. A flutuação é determinada para todos os sensores do espaço de trabalho e o maior valor encontrado é adotado como flutuação máxima. Para o guia DKD-R 5-7 (DKD, 2004), tanto para umidade relativa quanto para temperatura, a maior diferença entre uma medição do período de medições e o valor médio é denominada instabilidade temporal. A instabilidade temporal deve ser determinada pelo menos para o centro do volume útil, ou para o

local de medição de referência, e para cada ponto de calibração de temperatura e umidade pelos métodos de (A) a (C). A instabilidade temporal é equivalente a meia largura de uma distribuição de probabilidade retangular. As equações para calcular as incertezas referentes à instabilidade temporal são as seguintes:

$$u(\delta T_{\text{instab}}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \max|\bar{T} - T_i| \quad (7)$$

$$u(\delta h_{\text{instab}}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \max|\bar{h} - h_i| \quad (8)$$

Onde,

$u(\delta T_{\text{instab}})$ – Incerteza padrão devido à instabilidade temporal de temperatura

$u(\delta h_{\text{instab}})$ – Incerteza padrão devido à instabilidade temporal de umidade relativa

\bar{T} – Temperatura média temporal

T_i – Valor medido de temperatura para o local de medição i

\bar{h} – Umidade relativa média temporal

h_i – Valor medido de umidade relativa para o local de medição i

As variações das medições durante um período de tempo, segundo o guia *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003), são chamadas de flutuações. Para cada sensor de medição, tanto de temperatura quanto de umidade relativa, calcula-se a média e o desvio padrão das medições, o maior valor de desvio padrão é assumido como flutuação. Como a flutuação é o desvio padrão de repetidas medições, logo esta fonte de incerteza é computada no cálculo de incerteza da câmara como tendo distribuição normal.

As variações das medições na região de interesse da câmara e ao longo do período de medição são duas importantes contribuições no cálculo de incerteza da câmara em temperatura e/ou em umidade relativa. Geralmente, as variações ao longo do tempo são pequenas quando comparadas com as variações no espaço. Outras contribuições são ainda utilizadas no cálculo de incerteza da câmara.

2.1.12 Outras fontes e cálculo da incerteza expandida

De acordo com a norma NF X15-140 (AFNOR, 2002), a incerteza associada com o valor médio de temperatura ou umidade relativa de cada sensor do espaço de trabalho é calculada através da repetitividade das medições, que é obtida por meio do desvio padrão experimental, e da incerteza do dispositivo de medição, que deve levar em consideração a incerteza da calibração, a resolução, a deriva, etc.

O VIM (INMETRO, 2003) define resolução de um dispositivo mostrador como sendo a menor diferença entre indicações de um dispositivo mostrador que pode ser significativamente percebida, e define deriva como sendo a variação lenta de uma característica metrológica de um instrumento de medição.

As equações para calcular o valor médio das medições de cada sensor do espaço de trabalho, a repetitividade das medições e as incertezas associadas aos valores médios, conforme norma NF X15-140 (AFNOR, 2002), são as seguintes:

$$\text{Média de } n \text{ medições do sensor } j (x_{mj}): x_{mj} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ji} \quad (9)$$

$$\text{Desvio padrão experimental do sensor } j (s_j): s_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ji} - x_{mj})^2} \quad (10)$$

$$\text{Incerteza combinada } (u_{mj}): u_{mj} = \sqrt{s_j^2 + u_{cj}^2} \quad (11)$$

$$\text{Incerteza expandida } (U_{mj}): U_{mj} = k \times \sqrt{s_j^2 + u_{cj}^2} \quad (12)$$

Onde,

n – Número de medições

x_{ji} – Valor (temperatura ou umidade relativa) da medição i do sensor j

u_{cj} – Incerteza combinada do sensor j

k – Fator de abrangência

A norma NF X15-140 (AFNOR, 2002) define que a incerteza expandida (U) associada com a média dos valores médios de temperatura ou umidade relativa (média geral) é calculada multiplicando-se o fator de abrangência (k) pela incerteza combinada, que é obtida através do desvio padrão da reprodutibilidade, que caracteriza a heterogeneidade da câmara em relação ao espaço e ao tempo, e da

incerteza combinada do dispositivo de medição (u_c), que consiste no maior valor de incerteza combinada de um determinado sensor (u_{c_j}).

$$u_c = \max (u_{c_j}) \quad (13)$$

Para calcular o desvio padrão da reprodutibilidade, é necessário que se determine o desvio padrão da repetitividade (s_r). No caso em que as dispersões são significativamente diferentes entre os sensores, calcula-se o desvio padrão experimental para cada sensor (s_j) e adota-se como desvio padrão da repetitividade o maior valor encontrado.

$$\text{Desvio padrão da repetitividade } (s_r): s_r = \max (s_j) \quad (14)$$

O desvio padrão da repetitividade e o desvio padrão da reprodutibilidade são determinados de acordo com a norma NF ISO 5725-2 (AFNOR, 1994).

$$\text{Desvio padrão da repetitividade } (s_r): s_r = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N s_j^2} \quad (15)$$

$$\text{Desvio padrão da reprodutibilidade } (s_R): s_R = \sqrt{s_r^2 \left(1 - \frac{1}{n}\right) + \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (X_{mj} - X_{air})^2} \quad (16)$$

Onde,

$$\text{Média geral (temperatura ou umidade relativa): } x_{air} = \frac{1}{N \times n} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n x_{ji} \quad (17)$$

N – Número de sensores

A equação da incerteza expandida associada com a média geral é então:

$$\text{Incerteza expandida } (U): U = k \times \sqrt{s_R^2 + u_c^2} \quad (18)$$

O guia alemão DKD-R 5-7 (DKD, 2004) descreve que a incerteza de medição a ser declarada é composta por diversas fontes de incerteza, tais como: resolução

dos indicadores, efeito da radiação, efeito da carga, instabilidade temporal, não homogeneidade espacial e incerteza do dispositivo de medição de referência.

No caso da incerteza devido à resolução dos indicadores da câmara, tanto para temperatura quanto para umidade relativa, a menor incerteza é estimada como sendo a metade do valor do dígito e equivale a meia-largura de uma distribuição de probabilidade retangular.

A incerteza do sistema de medição de referência, tanto para temperatura quanto para umidade relativa, é estimada através da combinação de todas as suas contribuições de incerteza, tais como: incerteza de calibração, resolução, deriva, etc.

Já a contribuição do efeito da radiação na incerteza de medição é obtida conforme o método selecionado para estimar o efeito da radiação, e equivale a meia largura de uma distribuição de probabilidade retangular. As equações para calcular as incertezas referentes ao efeito da radiação [$u(\delta T_{\text{radiation}})$] são as seguintes:

$$\text{Método 1: } u(\delta T_{\text{radiation}}) = \frac{0,2}{\sqrt{3}} \times \max|T_{\text{le}} - T_{\text{he}}| \quad (19)$$

$$\text{Método 2: } u(\delta T_{\text{radiation}}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \max|T_{\text{le}} - T_{\text{he}}| \quad (20)$$

$$\text{Método 3: } u(\delta T_{\text{radiation}}) = \frac{0,1}{\sqrt{3}} \times \max|T_{\text{le}} - T_{\text{wall}}| \quad (21)$$

$$\text{Método 4: } u(\delta T_{\text{radiation}}) = \frac{0,3}{\sqrt{3}} \quad (22)$$

Onde,

T_{le} – Temperatura de um corpo com baixa emissividade

T_{he} – Temperatura de um corpo com alta emissividade

T_{wall} – Temperatura da parede

A contribuição do efeito da carga na incerteza de medição, segundo o guia DKD-R 5-7 (DKD, 2004), equivale a 20% da diferença entre a medição no local de medição de referência com carga e a medição no local de referência sem carga. O efeito da carga é equivalente a meia largura de uma distribuição de probabilidade retangular. As equações para calcular as incertezas referentes ao efeito da carga na temperatura [$u(\delta T_{\text{load}})$] e na umidade relativa [$u(\delta h_{\text{load}})$] são as seguintes:

$$u(\delta T_{\text{load}}) = \frac{0,2}{\sqrt{3}} \times \max |T_{\text{ref}} - T_{\text{ref,load}}| \quad (23)$$

$$u(\delta h_{\text{load}}) = \frac{0,2}{\sqrt{3}} \times \max |h_{\text{ref}} - h_{\text{ref,load}}| \quad (24)$$

Onde,

T_{ref} – Temperatura do local de referência sem carga

$T_{\text{ref,load}}$ – Temperatura do local de referência com carga

h_{ref} – Umidade relativa do local de referência sem carga

$h_{\text{ref,load}}$ – Umidade relativa do local de referência com carga

As incertezas expandidas referentes à calibração das indicações de umidade relativa (U_h) e temperatura (U_T) da câmara são obtidas através da multiplicação das incertezas combinadas, determinadas através da combinação das diversas fontes de incerteza, pelo fator de abrangência (k).

O guia *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003) descreve que o processo de avaliação da incerteza de uma medição ou calibração consiste de três passos: identificar, quantificar e representar cada fonte de incerteza como uma incerteza padrão; calcular a incerteza padrão combinada através da raiz quadrada da soma das incertezas ao quadrado; e calcular a incerteza expandida através da multiplicação da incerteza padrão combinada pelo fator de abrangência.

Segundo o guia, a incerteza padrão combinada da temperatura média da câmara, calculada através dos instrumentos de referência, é obtida através da combinação das seguintes contribuições de incerteza: incerteza da calibração do instrumento de referência, com distribuição normal; repetitividade do instrumento de referência, com distribuição normal, se determinado através de um conjunto de medições, ou com distribuição de probabilidade retangular, se tomado das especificações técnicas do instrumento; efeitos da temperatura no instrumento de referência, com distribuição de probabilidade retangular; deriva, linearidade e resolução do instrumento de referência, com distribuição de probabilidade retangular; gradiente e flutuação de temperatura, com distribuição normal; e incerteza da média global, determinada através da divisão do desvio padrão das medições pela raiz do número de medições, com distribuição normal. O valor da

incerteza padrão combinada é então multiplicado pelo fator de abrangência para se obter a incerteza expandida da temperatura média da câmara.

As incertezas referentes ao sensor da câmara, tais como: deriva, repetitividade e resolução, não são consideradas quando da análise da incerteza da medição de temperatura feita durante o uso da câmara; porém tais fontes devem ser consideradas quando da calibração da câmara. No caso de câmara com carga, o efeito da carga deve ser avaliado e considerado na análise de incerteza.

A incerteza da medição de temperatura de cada sensor é calculada conforme a incerteza da temperatura média da câmara, com exceção das seguintes fontes de incerteza: gradiente e incerteza da média global.

No caso da incerteza da umidade relativa média da câmara, calculada através dos instrumentos de referência, as fontes de incerteza que compõem a incerteza padrão combinada são as seguintes: incerteza da calibração do instrumento de referência, com distribuição normal; repetitividade do instrumento de referência, com distribuição normal, se determinado através de um conjunto de medições, ou com distribuição de probabilidade retangular, se tomado das especificações técnicas do instrumento; efeitos da temperatura no instrumento de referência, com distribuição de probabilidade retangular; deriva, linearidade e resolução do instrumento de referência, com distribuição de probabilidade retangular; gradiente e flutuação de umidade, com distribuição normal; gradiente da pressão parcial de vapor d'água, com distribuição de probabilidade retangular; e incerteza da média global, determinada através da divisão do desvio padrão das medições pela raiz quadrada do número de medições, com distribuição normal. O valor da incerteza padrão combinada é então multiplicado pelo fator de abrangência para se obter a incerteza expandida da umidade relativa média da câmara.

Assim como no caso de temperatura, as incertezas referentes ao sensor da câmara, tais como: deriva, repetitividade e resolução, não são consideradas quando da análise de incerteza da medição de umidade relativa feita durante o uso da câmara; porém tais fontes devem ser consideradas quando da calibração da câmara. No caso de câmara com carga, o efeito da carga deve ser avaliado e considerado na análise de incerteza.

Para o guia *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003), a incerteza de medição da condição atingida no interior da câmara pode ser analisada de duas formas: análise do caso médio e

análise do pior caso. Na análise do caso médio, a incerteza é determinada para a condição média (temperatura e/ou umidade relativa) determinada durante o uso da câmara. Este tipo de análise leva a uma declaração da seguinte forma: “a condição medida durante o teste foi (condição) \pm (incerteza) com nível de confiança de 95%”. A análise de pior caso utiliza dados do sensor que apresenta maior diferença em relação ao ponto de ajuste. A diferença entre o valor médio do sensor e o ponto de ajuste e o dobro do valor de flutuação deste sensor são adicionados à incerteza expandida do sensor. Este tipo de análise leva a uma declaração da seguinte forma: “Nenhum ponto do item sob teste esteve fora da faixa (ponto de ajuste) \pm (incerteza) com nível de confiança de 95%”. É possível utilizar este tipo de análise para declarar que as medições estiveram ou não dentro da tolerância especificada para a câmara.

2.1.13 Testes no ambiente da câmara

A norma francesa NF X15-140 (AFNOR, 2002) descreve algumas avaliações que podem ser feitas no ambiente atingido ou no ambiente transitório da câmara, como o tempo de recuperação de temperatura, o tempo de recuperação de umidade relativa, a temperatura transitória excessiva, a umidade relativa transitória excessiva e a taxa de mudança da temperatura.

O tempo de recuperação, tanto de temperatura quanto de umidade relativa, consiste no período requerido para o ambiente retornar ao estado estável após uma perturbação (abertura da porta da câmara, corte do fornecimento elétrico, etc.).

A taxa de mudança da temperatura caracteriza a capacidade da câmara de mudar de um valor de temperatura para outro dentro de um período de tempo. Esta avaliação é feita para cada sensor de temperatura e pode ser executada para câmara com ou sem carga no espaço de trabalho. Os valores a serem utilizados são aqueles mais próximos dos valores teóricos de 10% e 90% da faixa de temperatura. Assim, a velocidade média da variação de temperatura $[v_{mj}(\theta)]$ é calculada para cada sensor, conforme equação 25 abaixo, e o menor valor obtido é adotado como valor da velocidade de variação de temperatura no ambiente transitório.

$$v_{mj}(\theta) = \frac{\theta_{j10\%} - \theta_{j90\%}}{t_{j10\%} - t_{j90\%}} \quad (25)$$

Onde,

$\theta_{j10\%}$ – Valor de temperatura do sensor j próximo ao valor teórico de 10 % da faixa

$\theta_{j90\%}$ – Valor de temperatura do sensor j próximo ao valor teórico de 90 % da faixa

$t_{j10\%}$ – Instante em minutos do valor $\theta_{j10\%}$

$t_{j90\%}$ – Instante em minutos do valor $\theta_{j90\%}$

2.1.14 Verificação da câmara

Segundo a norma NF X15-140 (AFNOR, 2002), o objetivo da verificação é o de comparar os resultados obtidos durante a caracterização com as especificações da câmara para concluir se a câmara está conforme ou não com as especificações. Para a câmara ser declarada conforme, os valores médios dos sensores e suas incertezas expandidas (U_{mj}), para cada parâmetro específico, devem estar dentro do intervalo de erros máximos tolerados (EMT) em torno do valor desejado (x_{co}). A regra de conformidade é a seguinte:

$$\forall j = 1, \dots, N : (x_{mj} \pm U_{mj}) \in [x_{co} - EMT_{\min}; x_{co} + EMT_{\max}] \quad (26)$$

A diferença entre o valor médio do parâmetro (x_{air}) e a condição desejada (x_{co}) para o parâmetro é levada em consideração quando ela é significativa, em especial quando esta diferença é maior do que a incerteza expandida referente ao valor médio do parâmetro.

De acordo com a norma NF X15-140 (AFNOR, 2002), a decisão sobre a conformidade da câmara pode ser declarada da seguinte forma: conforme com todas as especificações, quando a regra de conformidade é cumprida para todos os parâmetros e valores especificados no espaço de trabalho; conforme após deslocar o valor de ajuste do parâmetro, quando a regra de conformidade é cumprida embora uma correção no valor de ajuste do parâmetro deva ser sistematicamente feita quando da utilização da câmara; conforme para certas especificações e não conforme para outras, quando a regra de conformidade não é cumprida para alguns parâmetros e valores especificados; e não conforme, quando a regra de

conformidade não é cumprida para todos os parâmetros e valores especificados para o espaço de trabalho.

Para o guia *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003), a verificação de que as medições estiveram ou não dentro da tolerância especificada para a câmara pode ser realizada através do cálculo de incerteza pela análise de pior caso.

2.1.15 Apresentação de resultados

A norma NBR ISO/IEC 17025 (ABNT, 2005), que tem por objetivo especificar os requisitos gerais para a competência em realizar ensaios e/ou calibrações, descreve que os resultados de cada ensaio, calibração, ou séries de ensaios ou calibrações realizadas pelo laboratório devem ser relatados com exatidão, clareza, objetividade, sem ambigüidade e de acordo com quaisquer instruções específicas nos métodos de ensaio ou calibração.

A norma francesa NF X15-140 (AFNOR, 2002) descreve que, no caso de caracterização da câmara, o relatório deve conter no mínimo: identificação da câmara, identificação do requisitante, data do procedimento, identificação da pessoa que conduziu a caracterização, referência à norma, referência ao procedimento de caracterização utilizado, todos os resultados de medição tratados, referência aos conectores para os instrumentos de referência, os métodos de incerteza de medição e os ajustes realizados (posição das partes móveis, deslocamento do valor de ajuste do parâmetro, etc.). No caso de verificação da câmara, o relatório deve conter ainda: referência ao documento que contém o critério de aceitação, os desvios fora dos limites dos erros máximos tolerados verificados antes e após o ajuste, e a decisão sobre a conformidade.

O guia alemão DKD-R 5-7 (DKD, 2004) descreve que o certificado de calibração deve conter no mínimo as seguintes informações: correção da indicação ou desvio da indicação de temperatura no local de medição de referência (métodos A e B) ou correção da indicação para o local de medição individual (método C); correção da indicação ou desvio da indicação de umidade relativa no local de medição de referência (métodos A e B) ou correção da indicação para o local de medição individual (método C); incerteza da indicação de temperatura; incerteza da indicação de umidade relativa; resultados detalhados das investigações, tais como:

homogeneidade, estabilidade, efeito da radiação, temperatura da parede, etc.; conformidade para temperatura e/ou umidade relativa, se solicitado pelo cliente; e condições de medição.

Cabe ressaltar que, o documento Expressão da Incerteza de Medição na Calibração (INMETRO, ABNT & SBM, 1999) recomenda que o valor numérico da incerteza de medição seja fornecido com no máximo dois algarismos significativos e que o valor numérico do resultado da medição, na declaração final, seja arredondado para o último algarismo significativo do valor da incerteza expandida, atribuída ao resultado da medição. O documento recomenda ainda que, quando o arredondamento diminui o valor numérico da incerteza de medição em mais de 5%, que este seja então feito para cima.

2.2 HIGROMETRIA

2.2.1 Introdução

Umidade é a presença de vapor d'água, forma gasosa da água, no ar ou em outro gás. Na prática, a origem da umidade deve-se ao fato de que a água, tanto em alta quanto em baixa temperatura, desprende vapor d'água. Outros materiais líquidos ou sólidos que possuem algum teor de água também desprendem, ou as vezes absorvem, vapor d'água. Todavia, o ar ou qualquer outro gás possui uma dada capacidade de absorver vapor d'água que depende principalmente da temperatura. Quanto maior a temperatura do ar, maior é sua capacidade de absorção do vapor d'água, conforme ilustrado na figura 14 a seguir (IMC, 1996):

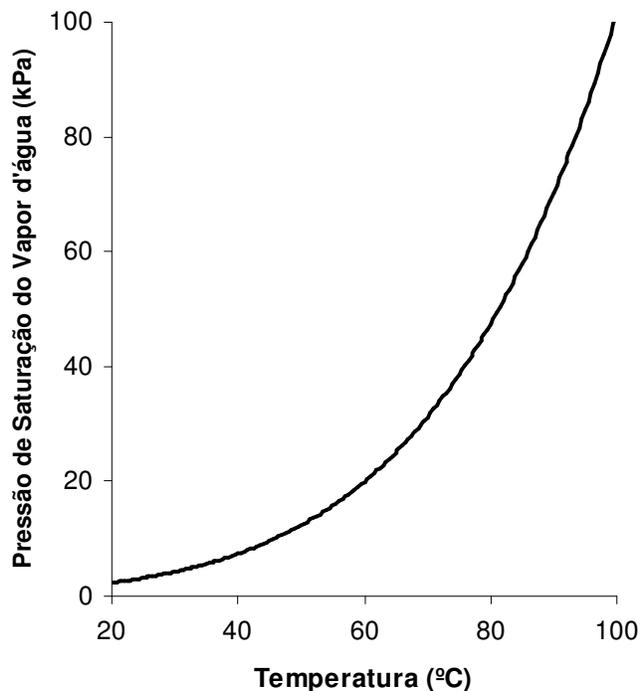


Figura 14 – Aumento da pressão de saturação do vapor d'água com a temperatura
Fonte: IMC, 1996

A umidade pode ser expressa e medida de diversas formas distintas. Sua medição é de extrema importância em muitas áreas de pesquisa, uma vez que a presença ou a ausência de vapor d'água influencia diversos processos físicos, químicos ou biológicos. Em diversos setores industriais, a medição e o controle da umidade viabilizam melhorias na qualidade do produto e/ou a redução de custos. A medição e o controle da umidade também é um aspecto relevante para a segurança e o conforto do ser humano.

2.2.2 Termos e definições

2.2.2.1 Ar úmido

O ar úmido é uma mistura binária de ar seco com vapor d'água, onde o ar seco é formado por vários constituintes gasosos, com composição relativamente constante, tais como: nitrogênio (78,084%), oxigênio (20,9476%), argônio (0,934%), dióxido de carbono (0,0314%), neônio (0,001818%), hélio (0,000524%), metano

(0,00015%), dióxido de enxofre (0 a 0,0001%), hidrogênio (0,00005%) e kriptônio, xenônio e ozônio (0,0002%) (ASHRAE, 1997 apud DIAS, 2001).

O vapor d'água e o ar seco podem ser admitidos como gases perfeitos, desta forma a equação de estado pode ser aplicada (ASHRAE, 1994).

$$\text{Ar seco:} \quad p_a V = N_a R T \quad (27)$$

$$\text{Vapor d'água:} \quad p_v V = N_v R T \quad (28)$$

Onde,

p_a – Pressão parcial do ar seco

p_v – Pressão parcial do vapor d'água

V – Volume total de ar úmido

N_a – Número de moles do ar seco

N_v – Número de moles do vapor d'água

R – Constante universal do gás (8,31441 Pa.m³ / mole.K)

T – Temperatura absoluta (K)

2.2.2.2 Temperatura de ponto de orvalho

É a 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 (BSI, 2002).

2.2.2.3 Temperatura de ponto de congelação (*frost point temperature*)

É a temperatura na qual a pressão do vapor de um gás úmido é igual a pressão de saturação do vapor sobre o gelo (sólido congelado) e na qual o condensado se forma como gelo no resfriamento do gás (BSI, 2002).

2.2.2.4 Pressão parcial do vapor d'água

É a parte da pressão total que é exercida pelo componente vapor de um gás úmido (BSI, 2002).

2.2.2.5 Pressão de saturação do vapor d'água

É a pressão máxima de vapor que pode existir em uma dada temperatura. A pressão de saturação do vapor, em pascal (Pa), pode ser calculada através das seguintes fórmulas de Sonntag (SONNTAG, 1990 apud BSI, 2002):

$$\begin{aligned} \text{Em relação à água: } \ln p_{sv} = & -6069,9385 \times T^{-1} + 21,2409642 - 2,711193 \times 10^{-2} \times T + \dots \\ & \dots + 1,673952 \times 10^{-5} \times T^2 + 2,433502 \times \ln T \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \text{Em relação ao gelo: } \ln p_{sv} = & -6024,5282 \times T^{-1} + 29,32707 + 1,0613868 \times 10^{-2} \times T + \dots \\ & \dots + (-1,3198825 \times 10^{-5}) \times T^2 - 0,49382577 \times \ln T \end{aligned} \quad (30)$$

Onde,

p_{sv} – Pressão de saturação do vapor d'água (em pascal)

\ln – logaritmo neperiano

T – Temperatura absoluta (K)

A pressão de saturação do vapor d'água, em Pascal (Pa), pode ser calculada de forma mais simples, porém menos exata, através das seguintes fórmulas de Magnus (BENTLEY, 1998):

$$\text{Em relação à água: } \ln p_{sv} = \ln 661,2 + \frac{17,62 \times t}{243,12 + t} \quad (31)$$

$$\text{Em relação ao gelo: } \ln p_{sv} = \ln 661,2 + \frac{22,46 \times t}{272,62 + t} \quad (32)$$

Onde,

t – Temperatura em grau Celsius ($^{\circ}\text{C}$)

A pressão do vapor d'água em função da temperatura de ponto de orvalho ou da temperatura de ponto de congelação é determinada através da equação 29 ou 30 ou 31 ou 32.

2.2.2.6 Temperatura de bulbo seco

É a temperatura medida por um sensor de temperatura.

2.2.2.7 Temperatura de bulbo úmido

É a temperatura medida por um termômetro revestido por uma mecha úmida. A temperatura de bulbo úmido ocorre quando a taxa na qual calor é transferido do ar para a superfície úmida por convecção e radiação é igual a taxa na qual a superfície úmida perde calor na forma de calor latente de vaporização.

2.2.2.8 Equação psicrométrica

A pressão parcial do vapor d'água (p_v) do ar pode ser calculada utilizando-se a temperatura de bulbo úmido (t_{bu}), a temperatura (t), a pressão atmosférica (p) e o coeficiente do psicrômetro (A), conforme equação psicrométrica a seguir (ASHRAE, 1994):

$$p_v = p_{v(t_{bu})} - A \times p \times (t - t_{bu}) \quad (33)$$

Onde,

$p_{v(t_{bu})}$ – Pressão de saturação do vapor d'água na temperatura de bulbo úmido

De acordo com a norma BS 1339-1 (BSI, 2002), os valores do coeficiente do psicrômetro (A) variam na faixa entre $6,2 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e $6,8 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ para pressões e temperaturas ambientais típicas para diversos tipos de psicrômetros. Um valor que tem sido usualmente utilizado é o de $6,66 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Sonntag (SONNTAG 1990, apud BSI, 2002) descreve a seguinte fórmula para psicrômetros do tipo Assmann, baseada em dados experimentais com temperatura de bulbo úmido de até $25 \text{ }^\circ\text{C}$, e recomenda sua utilização até $50 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$A = 6,53 \times 10^{-4} (1 + 0,000944 \times t_{bu}) \quad (34)$$

2.2.2.9 Umidade relativa

Expressa o quão saturado o ar está com vapor d'água. A umidade relativa (UR) é a razão entre a pressão do vapor d'água (p_v) e a pressão de saturação do vapor (p_{sv}) sobre uma superfície plana de água na mesma temperatura (IMC, 1996).

$$UR = \frac{p_v}{p_{sv}} \times 100 \quad (35)$$

2.2.2.10 Umidade absoluta

Umidade absoluta (UA) é a massa de vapor d'água (m_v) presente em um volume de ar úmido (V) (IMC, 1996).

$$UA = \frac{m_v}{V} \quad (36)$$

Dependendo da literatura, outros termos podem ser utilizados para este mesmo conceito, tais como: umidade absoluta volumétrica, concentração de vapor, concentração de massa, densidade de vapor ou teor de umidade por volume.

2.2.2.11 Razão da mistura ou razão de umidade

Razão da mistura ou razão de umidade (r) é a massa de vapor d'água (m_v) por unidade de massa de ar seco (m_a) com a qual o vapor d'água está associado (IMC, 1996).

$$r = \frac{m_v}{m_a} \quad (37)$$

2.2.2.12 Umidade específica

Umidade específica (UE) é a massa de vapor d'água (m_v) por unidade de massa de ar úmido (m_{au}) (IMC, 1996).

$$UE = \frac{m_v}{m_{au}} = \frac{m_v}{m_v + m_a} \quad (38)$$

2.2.3 Princípios de medição de umidade

Existem diversos tipos de efeitos relacionados com a umidade que podem ser explorados para indicar variações de umidade. Alguns dos métodos mais relevantes de medição de umidade são: mecânico, psicrométrico (bulbo úmido e bulbo seco), impedância elétrica (capacitivo ou resistivo), condensação, cloreto de lítio saturado, eletrolítico (pentóxido de fósforo), espectroscópico e mudança de cor. Existem ainda outros métodos que possuem suas utilizações em aplicações específicas, tais como: acústico, expansão adiabática, gravimétrico, lyman-alpha, fibra óptica, índice de refração óptico, piezoelétrico (oscilador de quartzo), ponte pneumática, zirconia, condutibilidade térmica e variação térmica (IMC, 1996).

Os higrômetros mais indicados para serem usados na avaliação de umidade da câmara operam nos seguintes princípios de medição:

2.2.3.1 Bulbo seco e bulbo úmido (psicrômetro)

Psicrômetro é um tipo de higrômetro que consiste de dois sensores de temperatura emparelhados. Um dos sensores é utilizado para medir a temperatura do ar e é denominado termômetro de bulbo seco. O outro sensor é revestido por uma mecha (tecido de algodão), que é mantida úmida através de um reservatório de água, e é denominado termômetro de bulbo úmido. As temperaturas de bulbo úmido e de bulbo seco são utilizadas para determinar a umidade relativa do ar por meio de cálculo, carta psicrométrica ou tabela.

Os psicrômetros podem ser aspirados ou não. O psicrômetro aspirado possui um ventilador que faz com que uma corrente de ar, com velocidade adequada, passe pelos termômetros, contribuindo para uma melhor exatidão das medições. Já o psicrômetro não aspirado é uma realização menos eficiente deste princípio e está mais propenso a erros.

A exatidão das medições dos psicrômetros não está limitada a exatidão das medições de temperatura, outros fatores estão envolvidos, tais como: pureza da

água, aspiração da corrente de ar, especificação e estado da mecha, efeitos da radiação, efeitos da pressão, e outros (ASHRAE, 1994).

Os psicrômetros apresentam as seguintes vantagens: podem possuir boa estabilidade; podem ser instrumentos relativamente simples, baratos, confiáveis e robustos; atendem uma vasta faixa de umidade e toleram altas temperaturas e condensação. As desvantagens dos psicrômetros são as seguintes: necessitam de alguma habilidade para uso e manutenção; os resultados podem exigir cálculos; a medição requer uma grande quantidade de amostra de ar; a amostra será umedecida pela evaporação da mecha; impurezas no ar ou na água podem contaminar a mecha; as medições podem ser complicadas abaixo de 10 °C, em função da dúvida entre a presença de água ou gelo na mecha quando esta cai abaixo de 0 °C; e os instrumentos do tipo não aspirado ou do tipo rodopio são propensos a sérios erros (IMC, 1996). As figuras 15 e 16, a seguir, representam, respectivamente, o psicrômetro aspirado e o não aspirado.



Figura 15 – Psicrômetro aspirado
Fonte: <http://www.mesdan.it>



Figura 16 – Psicrômetro não aspirado
Fonte: <http://www.imn.ac.cr>

2.2.3.2 Impedância elétrica

O sensor de um higrômetro de impedância elétrica consiste de um material higroscópico no qual dois eletrodos são fixados. A água absorvida altera a resistência e/ou a capacitância entre os eletrodos e esta alteração é detectada e indicada pela eletrônica associada (BENTLEY, 1998).

Segundo o documento *A Guide to the Measurement of Humidity* (IMC, 1996), os sensores capacitivos possuem melhor linearidade nos pontos mais baixos de

umidade relativa e os sensores resistivos possuem melhor linearidade nos pontos mais altos de umidade relativa.

Em geral, os higrômetros de impedância elétrica (figuras 17 a 19) apresentam as seguintes vantagens: são normalmente fáceis de serem utilizados e estão cada vez mais disponíveis com memória para armazenagem dos dados e adaptadores para utilização em pilhas de papéis, depósitos de grãos, etc. As desvantagens destes instrumentos são as seguintes: podem ter os valores de calibração alterados se utilizados em pontos de temperatura e/ou umidade altos, podem sofrer deriva e histerese e podem ser danificados por agentes químicos (IMC, 1996).



Figura 17 – Termohigrômetro
Fonte: <http://www.testo.de>



Figura 18 – Termohigrômetro
Fonte: <http://www.vaisala.com>



Figura 19 – Termohigrômetro
Fonte: <http://www.rotronic.ch>

2.2.3.3 Condensação

A temperatura de ponto de orvalho é medida pelo resfriamento de uma amostra de gás até que a condensação surja e pela observação da temperatura na qual isto ocorre (IMC, 1996).

Em um higrômetro óptico, a condensação do vapor d'água na forma de orvalho ou gelo é induzida sobre a superfície de um pequeno espelho dentro do instrumento. O início da condensação é sentido opticamente pela detecção de alterações na forma como o espelho reflete ou dispersa a luz. Outros higrômetros a condensação (não-ópticos) detectam a condensação eletricamente ou por meio de outros métodos, tal como, a alteração na frequência de ressonância de um cristal de quartzo (IMC, 1996).

No higrômetro de ponto de orvalho do tipo óptico, um dispositivo termelétrico (*Peltier*), que é uma bomba de calor, possui um pequeno espelho metálico refletivo

fixado a ele. Um amplificador de potência fornece corrente à bomba de calor, de forma, que a superfície do espelho seja resfriada abaixo da temperatura ambiente. Quando a temperatura de ponto de orvalho da amostra de gás que passa pelo espelho é atingida, gotículas de água começam a condensar na superfície do espelho. O espelho é iluminado por um diodo luminoso e a luz refletida pela superfície é recebida por um fototransistor, que é um receptor de luz. Assim que as gotículas se formam sobre a superfície, a luz refletida é abruptamente reduzida devido à dispersão. Um circuito elétrico fechado controla a corrente do dispositivo termelétrico, automaticamente, mantendo a superfície do espelho na temperatura na qual uma camada bem fina de orvalho é preservada. Deste modo, o espelho é controlado no ponto de orvalho e busca a temperatura ascendente ou descendente conforme o ponto de orvalho muda. Um termômetro de resistência de platina, encaixado bem abaixo da superfície do espelho, mede a temperatura e um mostrador digital fornece a indicação (GENERAL EASTERN, 1993).

Higrômetros de ponto de orvalho do tipo óptico (figuras 20 e 21) são geralmente utilizados como instrumentos de referência em calibrações. Estes instrumentos apresentam as seguintes vantagens: podem fornecer medições precisas, podem apresentar bom desempenho a longo prazo e possuem vasta faixa de medição. As desvantagens são as seguintes: normalmente requerem alguma habilidade para a operação, são geralmente caros, contaminação do espelho causa leituras incorretas e medições abaixo de 0 °C requerem uma cuidadosa interpretação a fim de verificar se o condensado é gelo ou água (IMC, 1996).



Figura 20 – Higrômetro óptico
Fonte: <http://www.mbw.ch>



Figura 21 – Higrômetro óptico
Fonte: <http://www.michell.co.uk>

2.3 TERMOMETRIA

2.3.1 Introdução

Temperatura pode ser pensada como uma medição da energia proporcional do movimento (energia cinética) dos átomos ou moléculas que compõem uma substância. Quanto mais quente algo está, mais rápido suas partículas constituintes se movem ou vibram. Similarmente, quanto mais frio algo está, mais vagarosamente suas partículas se movem, sendo que o limite ocorre quando todas as partículas podem ser consideradas estacionárias ou no seu estado mais “ordenado”, esta temperatura é então definida como zero absoluto (BENTLEY, 1998).

Segundo Santos & Petkovic (2003), os termômetros podem ser classificados em duas grandes classes. A primeira compreende os instrumentos nos quais o elemento sensor precisa estar em contato, o mais íntimo possível, com o corpo cuja temperatura se quer determinar, como por exemplo: termopares, termômetros de líquido em vidro, termômetros bimetálicos, etc. A segunda classe compreende os instrumentos capazes de determinar a temperatura de um corpo sem que o elemento sensor necessite estar em contato com o mesmo, como por exemplo: pirômetros ópticos e infravermelho.

2.3.2 Princípios de medição de temperatura

A temperatura não pode nunca ser medida diretamente, o que significa que cada medição de temperatura envolve o uso de algum tipo de sensor/transmissor calibrado para converter uma grandeza mensurável em um valor de temperatura. O sensor é o objeto, como um todo, que é utilizado para medir a temperatura, enquanto que o transdutor é a parte do sensor que converte mudança na temperatura em uma outra grandeza mensurável.

A tabela 1, a seguir, mostra alguns dos sensores/transdutores usados em medições de temperatura, cada um utilizando propriedades físicas que se alteram com a temperatura (BENTLEY, 1998).

Tabela 1 – Sensores de temperatura e as suas propriedades físicas transdutoras

Sensor	Propriedade Transdutora	Grandeza Medida
Termômetro de mercúrio em vidro	Expansão térmica	Comprimento
Termômetro de gás a volume constante	Expansão térmica	Pressão
Termômetro de resistência de platina	Resistência elétrica	Resistência
Termopar	Coeficiente de Seebeck	Tensão
Pirômetro óptico	Radiação térmica	Fluxo radiante
Termômetro acústico	Velocidade do som	Tempo
Termômetro de ruído	Ruído Johnson	Potência
Termômetro Termo-luminescente	Baixa da luminescência	Tempo

Fonte: Bentley (1998)

Os termômetros mais indicados para serem utilizados na avaliação de temperatura da câmara são os que operam nos seguintes princípios de medição:

2.3.2.1 Termometria de resistência

O princípio de funcionamento dos termômetros de resistência consiste na variação da resistência dos materiais com a temperatura. O primeiro a utilizar este princípio para medir temperatura foi Willian Siemens (1871), porém a termometria de resistência de precisão só teve início com a publicação do trabalho de Hugh Callendar (1887) sobre medição de temperatura com termômetros de resistência. Callendar superou os problemas do termômetro de Siemens mostrando que a resistência de um termômetro de resistência de platina fabricado de modo adequado poderia ser relacionada com as indicações de um termômetro de gás por meio de uma equação de interpolação até cerca de 600 °C (CHATTLE, 1991 apud SANTOS & PETKOVIC, 2003).

Os termômetros de resistência podem ser fabricados com diversos materiais: cobre, ferro-ródio, níquel, platina, semicondutor, etc. (SANTOS & PETKOVIC, 2003). Os termômetros de semicondutor apareceram mais recentemente e receberam o nome de termistores. A diferença básica é a forma de variação da resistência elétrica com a temperatura. Nos metais, a resistência aumenta quase que linearmente com a temperatura enquanto que nos semicondutores ela varia de maneira não-linear de forma positiva ou negativa (GÜTHS & PAULO, 1998).

Os sensores mais utilizados na indústria e em laboratórios de calibração são os de platina. Os valores típicos da resistência dos termômetros padrões de resistência de platina (TPRP) em 0 °C são: 0,25 Ω, 2,5 Ω e 25 Ω. Os termômetros industriais de resistência de platina (TIRP) têm valores de resistência em 0 °C bem mais altos, entre 100 Ω e 1000 Ω; contudo, o mais comumente usado é o de 100 Ω (SANTOS & PETKOVIC, 2003).

Nos termômetros industriais, o resistor é conectado a dois, três ou quatro fios; enquanto que nos termômetros padrões o resistor é sempre conectado a quatro fios. A conexão com dois fios é o tipo de ligação que apresenta o pior resultado, pois a temperatura altera a resistência dos cabos juntamente com a resistência do sensor. A conexão com três fios permite compensar a resistência dos cabos de ligação, porém isto ainda contém um erro devido ao sistema de compensação assumir que as resistências de todos os fios são iguais. Já na conexão com quatro fios, uma fonte de corrente estável (geralmente de 1 mA) é empregada apenas para polarizar o sensor, não tendo comunicação com os outros dois terminais que são usados apenas para medir a tensão elétrica sobre o sensor. Assim, a resistência dos cabos de ligação é eliminada do circuito, tornando as medições mais exatas (SANTOS & PETKOVIC, 2003).

Há no mercado uma vasta faixa de termômetros industriais de resistência de platina disponíveis em várias formas e tamanhos. O que é comum entre todos eles é o fato de que a resistência de platina está firmemente sustentada, geralmente por estar inteiramente fixada em vidro ou cerâmica. Isto faz com que o termômetro fique extremamente robusto, mas ao mesmo tempo reduz a estabilidade da sua resistência (QUINN, 1983).

A norma ASTM E 1137 (ASTM, 2001), que tem por finalidade abordar os requisitos dos termômetros industriais de resistência de platina de bainha metálica para a faixa de temperatura de -200 °C a 650 °C, divide este tipo de instrumento em duas classes conforme sua tolerância, são elas:

$$\text{Classe A: } \pm[0,13 + 0,0017 \times |t|] \quad (39)$$

$$\text{Classe B: } \pm[0,25 + 0,0042 \times |t|] \quad (40)$$

Onde,

t – Temperatura, em módulo, em grau Celsius (°C)

Já a norma IEC 60751 (IEC, 1983) especifica os requisitos dos termômetros industriais de resistência de platina para a faixa de $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $850\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Dentre os três grandes tipos de termômetros (termômetro de vidro, termopar e termômetro de resistência), o termômetro de resistência de platina é o que apresenta a maior exatidão, possuindo também grande estabilidade e reprodutibilidade (SANTOS & PETKOVIC, 2003). Sendo assim, o termômetro de resistência de platina pode ser utilizado como instrumento de referência para a calibração de outros sensores de temperatura.

Orlando (2003) propôs um procedimento de calibração de termômetro de resistência de platina de $100\ \Omega$ para ser usado como padrão de trabalho em laboratórios de serviços metrológicos, ressaltando que um ajuste pelo método dos mínimos quadrados é importante para reduzir a incerteza do mesmo.

As figuras 22 e 23, a seguir, são exemplos de termômetros de resistência.



Figura 22 – Termômetro de resistência
Fonte: <http://www.picotech.com>



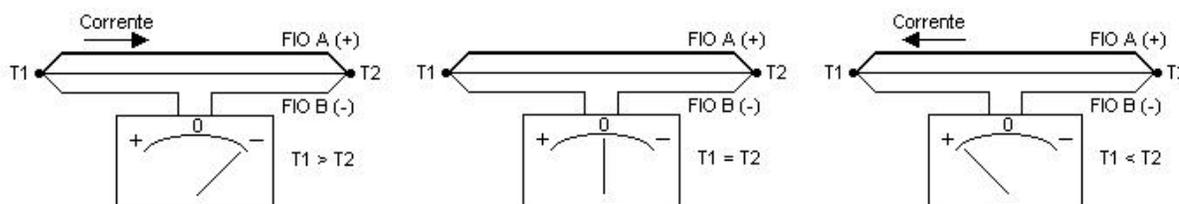
Figura 23 – Termômetros de resistência
Fonte: <http://www.regmet.cz>

2.3.2.2 Termopar

Um termopar é constituído por dois fios de materiais distintos, denominados termoelementos, unidos eletricamente para formar um circuito. As junções dos dois fios quando expostas a temperaturas distintas geram uma força eletromotriz (fem). Este fenômeno foi descoberto em 1821 por Seebeck (SANTOS & PETKOVIC, 2003).

Seebeck descobriu a existência de correntes termelétricas enquanto observava efeitos eletromagnéticos associados a circuitos de bismuto e cobre e de bismuto e antimônio. Seus experimentos mostraram que, quando as junções de dois metais dissimilares que formam um circuito fechado são expostas à temperaturas diferentes, uma força eletromotriz térmica líquida é gerada induzindo uma corrente elétrica contínua (ASTM, 1974).

A fem termelétrica ou força eletromotriz (E) que surge no circuito formado pela união de dois condutores A e B expostos a um gradiente térmico é também chamada de fem de Seebeck, tensão de Seebeck, fem do termopar ou tensão termelétrica (SANTOS & PETKOVIC, 2003).



Figuras 24 a 26 – Efeito Seebeck em um circuito de termopar
Fonte: Santos & Petkovic (2003)

Matematicamente a fem termelétrica do circuito pode ser expressa por:

$$E_{AB} = \int_{T_2}^{T_1} S_A dt + \int_{T_1}^{T_2} S_B dt \quad (41)$$

Onde,

S_A e S_B – Coeficientes de Seebeck ou potência termelétrica dos fios A e B

T_1 e T_2 – Temperaturas das junções quente e fria

Em um termopar, a extremidade em que se faz a união dos termoelementos e que é colocada no local cuja temperatura se que medir é denominada junção de medição, enquanto que a outra é denominada junção de referência. Quando a temperatura da junção de referência for 0 °C, a fem termelétrica dependerá apenas da temperatura da junção de medição. Desta forma, geralmente a temperatura de referência utilizada é o 0 °C (temperatura de fusão do gelo), pois este é um ponto fixo de temperatura de fácil realização com excelente exatidão para esta aplicação.

Dentre as vantagens dos termopares pode-se citar: a ampla faixa de trabalho (de -270 °C a mais de 2000 °C), o tamanho do seu elemento sensor pode ser convenientemente escolhido e a possibilidade de realizar aquisição automática de dados com custo relativamente baixo. Dentre as desvantagens, pode-se citar a necessidade de um certo conhecimento prévio do operador para prevenir a introdução de erros grosseiros nas medições (SANTOS & PETKOVIC, 2003).

A designação das letras dos termopares foi originalmente introduzida pela sociedade *Instrument Society of America* (ISA), alcançando aceitação mundial como um método conveniente de se referir aos diferentes tipos de termopares. Convencionalmente, a liga positiva (+) é informada primeiro quando se descreve a composição (QUINN, 1983).

Alguns dos tipos mais comuns de termopares são: termopar tipo B (70% platina – 30% ródio x 94% platina – 6% ródio), termopar tipo E (90% níquel – 10% cromo x 55% cobre – 45% níquel), termopar tipo J (ferro x 55% cobre – 45% níquel), termopar tipo K (90% níquel – 10% cromo x 95% níquel – 5% alumínio), termopar tipo N (84,5% níquel – 14% cromo – 1,5% silício x 95,4% níquel – 4,5% silício – 0,1% magnésio), termopar tipo R (87% platina – 13% ródio x 100% platina), termopar tipo S (90% platina – 10% ródio x platina) e termopar tipo T (cobre x 55% cobre – 45% níquel) (SANTOS & PETKOVIC, 2003).

A norma NBR 12771 (ABNT, 1999) estabelece as tabelas de referência usadas na conversão da força eletromotriz térmica gerada pelo termopar em função da temperatura e vice-versa. A figura 27 mostra exemplos de termopares.



Figura 27 – Termopares
Fonte: <http://www.ecil.com.br>

2.4 GESTÃO

2.4.1 Gestão e metrologia

Metrologia, segundo o VIM (INMETRO, 2003), é a ciência da medição. A metrologia tem como foco principal prover confiabilidade, credibilidade, universalidade e qualidade às medidas. Como as medições estão presentes, direta

ou indiretamente, em praticamente todos os processos de tomada de decisão, a abrangência da metrologia é imensa, envolvendo a indústria, o comércio, a saúde e o meio ambiente, para citar apenas algumas áreas. Estima-se que cerca de 4 a 6% do PIB nacional dos países industrializados sejam dedicados aos processos de medição (BIPM, 1998 apud INMETRO, 2003).

Nos últimos anos, a importância da metrologia no Brasil e no mundo cresceu significativamente devido, principalmente, a cinco fatores (INMETRO, 2003):

- a) a elevada complexidade e sofisticação dos modernos processos industriais, intensivos em tecnologia e comprometidos com a qualidade e a competitividade, requerendo medidas de alto refinamento e confiabilidade para um grande número de grandezas;
- b) a busca constante por inovação, como exigência permanente e crescente para competitividade, propiciando o desenvolvimento de novos e melhores processos e produtos; melhores medidas podem levar a melhorias incrementais da qualidade, bem como a novas tecnologias, ambos importantes fatores de inovação;
- c) a crescente consciência da cidadania e o reconhecimento dos direitos do consumidor e do cidadão, amparados por leis, regulamentos e usos e costumes consagrados – que abrem e garantem o acesso a informações mais detalhadas e transparentes – bem como a grande preocupação com saúde e meio ambiente, tornando imprescindíveis medidas confiáveis em novas e complexas áreas, especialmente a química. É importante destacar a crescente relevância da metrologia nas áreas de análises clínicas e de equipamentos médicos;
- d) a recente aceleração da globalização, potencializando a demanda por metrologia, em virtude da grande necessidade de harmonização nas relações de troca, atualmente muito mais intensas, complexas, e envolvendo um grande número de grandezas a serem medidas com exatidão e credibilidade;
- e) no Brasil, especificamente, a entrada em operação das Agências Reguladoras intensificou sobremaneira a demanda por metrologia em áreas que antes não necessitavam de um grande rigor, exatidão e imparcialidade nas medições, como alta tensão, grandes vazões e grandes volumes de fluidos.

Adicionalmente, e como reflexo e consequência dos fatores mencionados, outros desafios se colocam à metrologia. Nesse quadro, chama especialmente a atenção, como decorrência da globalização, a substituição das tradicionais barreiras

tarifárias ao comércio entre nações pelas denominadas barreiras técnicas, muitas vezes envolvendo sutilezas na especificação de grandezas e processos de medição, o que vem ressaltar ainda mais o papel fundamental da metrologia nesse novo cenário (INMETRO, 2003).

Para entrar no mercado internacional, uma empresa sabe que seus produtos estão sujeitos a um rígido controle metrológico e, seguindo a definição de estratégia estabelecida por Montgomery e Porter (1991 apud MARINHO, 2000) como sendo o conjunto de ações para a consecução de objetivos de transformação ou manutenção do curso normal dos acontecimentos, faz-se necessário estabelecer critérios de qualidade baseados na metrologia já na fase de planejamento estratégico da empresa (MARINHO, 2000).

No setor de saúde, Lucatelli (2003) descreve que certas questões da gestão da manutenção no ambiente hospitalar podem ser respondidas pela metrologia, por meio de ensaios/calibração de equipamentos eletromédicos, realizados por laboratórios comprovadamente competentes. De acordo com Nóbrega & Silva (2003), as atividades de verificação e calibração são essenciais na gestão da manutenção de equipamentos das unidades eletrocirúrgicas de alta frequência (UEAF).

As medições são atividades fundamentais para a gestão das organizações. Mesquita (2003) descreve um modelo para gestão da qualidade das medições na organização, ou de gestão da confiabilidade metrológica, que objetiva facilitar o entendimento do processo de obtenção da informação com as características desejadas pelo cliente, e que serve de base para o modelo de gestão da tecnologia das medições nas organizações (GTM), que tem como principal função manter a adequação dos sistemas de medição aos propósitos organizacionais e as exigências do mercado. Os principais benefícios que podem ser obtidos pelo uso do modelo GTM são: a facilitação da disseminação do conhecimento sobre tecnologia das medições na organização e o estabelecimento de uma referência para o desenvolvimento da gestão destes recursos dentro da organização.

2.4.2 Sistemas de gestão

As mudanças significativas que vêm ocorrendo no dinâmico mundo dos negócios fazem com que as organizações necessitem de um planejamento que lhes

propiciem condições de enfrentar os desafios e criar vantagens competitivas sobre os competidores. Contudo, para alinhar o seu planejamento estratégico com suas ações operacionais, a organização necessita de um ou mais sistemas de gestão.

Diversos sistemas de gestão estão publicamente disponíveis por meio de normas internacionalmente aceitas, tais como: NBR ISO 9001 (ABNT, 2000) para gestão da qualidade, NBR ISO 14001 (ABNT, 2004) para gestão ambiental, OHSAS 18001 (OHSAS, 1999) para gestão de saúde e segurança, etc.

A *International Organization for Standardization* (ISO) é uma federação de caráter internacional que congrega organismos de mais de cem países, sendo um de cada país. É uma organização não-governamental criada em 1947, cujo objetivo é desenvolver e promover normas e padrões mundiais que traduzam o consenso dos diferentes países do mundo. A ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, representa o Brasil na ISO (FIRJAN, 2005).

A norma NBR ISO 9001 (ABNT, 2000) determina os requisitos gerais para implantação de sistema de qualidade. Tem como princípios básicos à garantia da satisfação dos clientes e a preocupação em adotar medidas de controle de qualidade dos produtos e serviços, através do estabelecimento de procedimentos-padrão, além do atendimento dos requisitos legais. A ISO série 9000 é um conjunto de normas técnicas que trata exclusivamente do assunto gestão de qualidade (AMBIENTE BRASIL, 2004 apud SANDRES, 2004).

A norma ISO 14001 (ABNT, 2004) especifica os requisitos relativos a um sistema de gestão ambiental, permitindo a uma organização formular uma política e objetivos que levem em consideração os requisitos legais e as informações referentes aos impactos ambientais significativos. Ela se aplica aos aspectos ambientais que possam ser controlados pela organização e sobre os quais presume-se que ela tenha influência, conforme artigo do CB-38 (ABNT, 2004).

A certificação segundo a OHSAS 18001 acabou vindo de encontro para a necessidade das empresas de demonstrarem seu compromisso com a redução dos riscos ambientais e com a melhoria contínua de seu desempenho em saúde ocupacional e segurança de seus colaboradores (REVISTA METROLOGIA & INSTRUMENTAÇÃO, 2004).

2.4.3 Sistemas de gestão para laboratórios de calibração e ensaio

A norma ISO/IEC 17025 (*General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories*), que especifica os requisitos gerais para as organizações que realizam ensaios e/ou calibrações, foi disponibilizada em 1999 pela ISO. No Brasil, a norma equivalente é a NBR ISO/IEC 17025 (Requisitos Gerais para a Competência de Laboratórios de Ensaio e Calibração), onde a primeira edição foi disponibilizada pela ABNT em 2001.

A acreditação de laboratórios é concedida com base na norma ISO/IEC 17025, de acordo com diretrizes estabelecidas pela *International Laboratory Accreditation Cooperation* (ILAC), fórum internacional que engloba os organismos de acreditação (credenciamento) de laboratórios de calibração e ensaio, e nos códigos de Boas Práticas de Laboratório (BPL) da *Organization for Economic Cooperation and Development* (OECD), organização para a cooperação e o desenvolvimento econômico (INMETRO, 2005). Desta forma, temos uma única norma internacional sendo utilizada pelos laboratórios de calibração e ensaio, o que facilita a harmonização de suas práticas e a aceitação mútua dos resultados destes laboratórios no comércio internacional.

Segundo Medeiros et al. (2003), as grandes diferenças da NBR ISO 9000 em relação a NBR ISO/IEC 17025 são: a NBR ISO/IEC 17025 é específica para laboratórios, já a ISO 9000 pode ser implementada em organizações de diferentes tipos e ramos de atividades; a NBR ISO/IEC 17025 exige evidência da competência técnica da equipe do laboratório, na ISO 9000 a competência ainda não tem a importância devida; a versão ISO 9000 do ano de 2000 ficou flexível com relação à necessidade da empresa dispor ou não de procedimentos documentados, já a NBR ISO/IEC 17025 exige claramente que o laboratório documente uma série de procedimentos; e a exigência da realização de auditorias internas na área técnica pela NBR ISO/IEC 17025.

Nos laboratórios de ensaio, com a implantação de sistemas de gestão da qualidade baseado na norma NBR ISO/IEC 17025, a forma e a linguagem utilizadas nos relatórios de ensaios passam a ser comparáveis, além do cliente poder optar pelo laboratório que fará seu ensaio, baseado na sua competência. De certo modo, isto põe fim ao “leilão” de preços por ensaios e faz com que os laboratórios tenham que mostrar sua competência (FILHO, 2003).

De acordo com Carvalho & Neves (2003), a causa fundamental para o insucesso na implementação de um eficiente e eficaz sistema de gestão da qualidade está na falta de consciência e crença por parte da pessoa que tem o poder de decisão (alta administração) da importância da qualidade e melhoria contínua nas atividades do laboratório.

Todavia, segundo Medeiros et al. (2003), os benefícios da implantação de um sistema da qualidade segundo a da NBR ISO/IEC 17025 são: melhoria na organização interna, aumento significativo da produtividade da equipe, aumento da confiabilidade metrológica dos resultados e melhoria da imagem do laboratório perante seus clientes.

3. ANÁLISE EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUÇÃO

As medições executadas para este trabalho têm como objetivo demonstrar os procedimentos de avaliação de uma câmara climática e os métodos de se tratar os dados coletados, conforme os documentos utilizados como base teórica para a sua elaboração. A apresentação da instrumentação utilizada, da montagem do sistema, da aquisição das medições e do tratamento matemático dos dados facilitam a compreensão dessas etapas por meio da aplicabilidade dos conceitos apresentados. Foram realizadas medições de temperatura e umidade do ar no interior da câmara climática do Laboratório de Higrimetria do INMETRO (LAHIG). Todas as medições foram executadas sem carga no interior da câmara.

O LAHIG, referência nacional em umidade, iniciou a prestação de serviços de calibração de sensores de umidade e temperatura (termohigrômetros, psicrômetros, termohigrógrafos, etc.) em 1998. Como padrões de referência em umidade, o LAHIG conta com dois higrômetros de ponto de orvalho do tipo espelho resfriado. Um higrômetro opera na faixa de $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura de ponto de orvalho e o outro higrômetro opera na faixa de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura de ponto de orvalho, ambos rastreáveis aos padrões de umidade de institutos nacionais de metrologia do exterior. Como padrões de referência em temperatura, o LAHIG conta com diversos termômetros de resistência de platina de $100\ \Omega$ a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (PT-100) calibrados pelo Laboratório de Termometria do INMETRO (LATER). Para geração da amostra de ar, o LAHIG conta com um gerador de ponto de orvalho e de uma câmara climática com controle de umidade e temperatura. Os sistemas de calibração do LAHIG contam ainda com diversos outros equipamentos e instrumentos auxiliares, tais como: multímetro, barômetro, secador de ar, destilador de água, compressor, bomba de sucção, etc. A figura 28, a seguir, mostra os principais equipamentos do LAHIG.



Figura 28 – Laboratório de higrimetria do INMETRO
Fonte: Elaboração própria

Grande parte dos serviços de calibração prestados pelo LAHIG, geralmente sensores de umidade relativa, são executados na câmara climática, cujo objetivo é gerar uma atmosfera onde os instrumentos sob calibração são submetidos. Desta forma, este equipamento é de extrema importância para o laboratório.

Para o LAHIG, a avaliação da câmara climática é de extrema relevância, especialmente quanto as diferenças de temperatura no seu interior, visto que estas representam uma considerável fonte de incerteza na calibração de sensores de umidade, não considerar tal efeito pode levar a erros tão grandes que a medição de umidade torna-se sem sentido.

A tabela 2, a seguir, mostra o efeito da mudança de 1 °C em vários níveis de temperatura e umidade relativa.

Tabela 2 – Efeito da mudança de 1 °C

Umidade Relativa	Temperatura				
	10 °C	20 °C	30 °C	50 °C	70 °C
10 %ur	± 0,7 %ur	± 0,6 %ur	± 0,6 %ur	± 0,5 %ur	± 0,5 %ur
50 %ur	± 3,5 %ur	± 3,2 %ur	± 3,0 %ur	± 2,6 %ur	± 2,3 %ur
90 %ur	± 6,3 %ur	± 5,7 %ur	± 5,4 %ur	± 4,6 %ur	± 4,1 %ur

Fonte: *A guide to the measurement of humidity* (IMC, 1996)

É de extrema importância que o usuário de uma câmara (térmica ou climática) conheça o seu comportamento. A inobservância de um ou mais parâmetros, tais como: diferenças de temperatura no espaço interno, flutuações de temperatura ao

longo do tempo, desvios em relação aos valores ajustados, tempos de estabilização e outros, podem invalidar ou causar erros em determinados ensaios ou calibrações.

3.2 INSTRUMENTOS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

3.2.1 Câmara climática

Foi utilizada uma câmara climática (figura 29, a seguir) 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, faixa de operação de temperatura de ponto de orvalho de -3 °C a 94 °C e faixa de operação de temperatura de -75 °C a +180 °C. A porta da câmara é composta por cinco camadas de vidro afastadas 30 mm uma da outra.

O controle da temperatura e da umidade relativa do ar no interior da câmara é feito através de dois termômetros de resistência de platina de 100 Ω . Um termômetro mede a temperatura de bulbo seco e o outro mede a temperatura de bulbo úmido. O termômetro que mede a temperatura de bulbo úmido é revestido por uma mecha (tecido de algodão) que é mantida úmida por meio de um reservatório de água destilada.

A operação da câmara pode ser feita por um painel localizado na sua lateral ou por um *software* desenvolvido pelo fabricante. Instruções de uso e manutenção da câmara estão descritas no procedimento NIT-LAHIG-005 (INMETRO, 2003).



Figura 29 – Câmara climática
Fonte: Elaboração própria

3.2.2 Higrômetro

Para a medição da temperatura de ponto de orvalho no interior da câmara, um higrômetro de ponto de orvalho do tipo espelho resfriado foi utilizado, conforme mostra, a seguir, a figura 30.

O instrumento, referência do país em umidade, 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 é rastreado ao gerador padrão de umidade do laboratório de higrimetria do *Centre Technique des Industries Aerauliques et Thermiques* (CETIAT), laboratório de referência na França. O higrômetro possui o código de identificação PR 002. A última calibração do instrumento foi realizada pelo CETIAT em novembro de 2004 e os certificados de calibração H 01 1754 1B e H 01 1754 1C foram emitidos.

O princípio de operação deste tipo de instrumento foi explicado no capítulo 2. Instruções de uso e manuseio do higrômetro estão descritas no procedimento NIT-LAHIG-0004 (INMETRO, 2003).



Figura 30 – Higrômetro de ponto de orvalho
Fonte: Elaboração própria

3.2.3 Termômetros

Para medição da temperatura no interior da câmara, foram utilizados nove sensores de resistência de platina de $100\ \Omega$ conectados a quatro fios a um indicador digital de dezesseis canais com resolução de $0,0001\text{ }^{\circ}\text{C}$.

O indicador digital de temperatura possui o código de identificação PR 003 e os sensores possuem os seguintes códigos de identificação: PR 004, PR 005, PR 006, PR 007, PR 008, PR 009, PR 012, PR 016 e PR 018. Os sensores foram calibrados juntamente com o indicador digital no LATER. A última calibração dos

instrumentos foi realizada em janeiro de 2004, na faixa $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, e os seguintes certificados de calibração foram emitidos: DIMCI 0048/2004, DIMCI 0049/2004, DIMCI 0050/2004, DIMCI 0053/2004, DIMCI 0054/2004, DIMCI 0055/2004, DIMCI 0056/2004, DIMCI 0057/2004 e DIMCI 0058/2004.

O princípio de operação deste tipo de sensor foi explicado no capítulo 2. Instruções de uso e manuseio dos sensores e do indicador digital estão descritas no procedimento NIT-LAHIG-0004 (INMETRO, 2003). As figuras 31 e 32, a seguir, mostram, respectivamente, dois sensores de resistência de platina e o indicador digital de temperatura.



Figura 31 – Sensores de resistência de platina
Fonte: Elaboração própria



Figura 32 – Indicador digital de temperatura
Fonte: Elaboração própria

3.2.4 Multímetro

Para fazer a aquisição das leituras de temperatura e umidade relativa da câmara e da temperatura de ponto de orvalho do higrômetro, um multímetro digital de $6\frac{1}{2}$ dígitos foi utilizado, conforme mostra, a seguir, a figura 33.

O instrumento, código de identificação LATER PR 051, é equipado com uma placa que possibilita a leitura de diversos instrumentos simultaneamente. O instrumento foi calibrado pela Divisão de Metrologia Elétrica do INMETRO (DIELE) no ano de 2004 e os seguintes certificados de calibração foram emitidos: DIMCI 2047/2004 e DIMCI 2140/2004.



Figura 33 – Multímetro digital
Fonte: Elaboração própria

3.3 VERIFICAÇÕES DOS INSTRUMENTOS

A norma NBR ISO/IEC 17025 (ABNT, 2005) estabelece que verificações necessárias à manutenção da confiança no *status* da calibração dos padrões de referência, primário, de transferência e de trabalho devem ser realizadas de acordo com procedimentos e cronogramas definidos.

Desta forma, a verificação periódica do higrômetro e dos termômetros do laboratório se fez necessária para evidenciar a manutenção da confiança no *status* de suas calibrações, garantindo assim os resultados das medições realizadas e o atendimento de um requisito do sistema de gestão do laboratório.

3.3.1 Higrômetro

No caso do higrômetro, a verificação foi realizada através da comparação de suas leituras com outro higrômetro padrão na faixa de sobreposição, ou seja, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura de ponto de orvalho, conforme procedimento NIT-LAHIG-009 (INMETRO, 2003).

O higrômetro de referência PR 002 foi então comparado com o higrômetro de referência PR 001 nas seguintes temperaturas de ponto de orvalho: $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (BRIONIZIO et al., 2005).

O higrômetro PR 001, que opera na faixa de $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura de ponto de orvalho, possui resolução de $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ e é rastreado ao gerador padrão de umidade do laboratório de higrometria do *National Physical Laboratory* (NPL),

laboratório de referência no Reino Unido. A última calibração do instrumento foi realizada pelo NPL em dezembro de 2002 e o certificado de calibração MH0101/EN02/140 foi emitido.

3.3.1.1 Sistemas de amostragem

As amostras de ar utilizadas na comparação dos instrumentos foram geradas pela câmara climática, identificada no item 3.2.1, ou pelo gerador de ponto de orvalho. O gerador, do tipo fluxo misturado, opera na faixa de $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura de ponto de orvalho e possui ajuste manual do ponto de orvalho, por meio de válvulas reguladoras, ou ajuste automático. Antes de chegar ao gerador, o ar é comprimido por um compressor e enviado ao secador de ar onde é desumidificado. No gerador, o ar desumidificado é dividido em dois fluxos, onde um permanece seco e o outro é enviado ao saturador onde é umedecido. A temperatura de ponto de orvalho é então produzida através da mistura do fluxo de gás seco com o fluxo de gás úmido.

Quando da utilização da câmara climática, a amostra de ar foi conduzida ao higrômetro padrão PR 001 através de uma bomba de sucção instalada na saída do instrumento, com o ajuste da vazão feito por meio de uma válvula reguladora, e ao higrômetro padrão PR 002 através de seu sistema de aspiração próprio.

Quando da utilização do gerador, não foi necessário utilizar dispositivos de aspiração para os higrômetros, pois as amostras de ar geradas foram insufladas pelo próprio gerador. Neste caso, válvulas para controle da vazão foram utilizadas.

Todas as conexões entre os sistemas de geração da amostra de ar (câmara e gerador) e os higrômetros foram feitas com tubos de aço inoxidável e/ou mangueiras de teflon.

3.3.1.2 Execução das medições

Tanto o gerador quanto a câmara climática levaram cerca de uma hora para estabilizar a amostra de ar gerada. Após a estabilização, foram feitas dez leituras, em intervalos de um minuto, das temperaturas de ponto de orvalho indicadas pelos higrômetros. Cada temperatura de ponto de orvalho média foi obtida através da média aritmética das dez leituras.

Em todos os pontos realizados abaixo de 0 °C, a condensação formada na superfície de cada espelho ocorreu na forma de gelo (*frost point*). Tal fato pôde ser evidenciado através do microscópio do higrômetro PR 001.

Nos pontos -40 °C, -30 °C e -20 °C de temperatura de ponto de orvalho, os sensores dos higrômetros foram resfriados. No caso do higrômetro PR 001, o sensor do instrumento foi resfriado entre -15 °C e -5 °C através da sua unidade de refrigeração direta. Já no caso do higrômetro PR 002, o sensor foi resfriado com água a 5 °C através de uma unidade externa de refrigeração.

Todas as medições de temperatura de ponto de orvalho das amostras de ar geradas, tanto pela câmara quanto pelo gerador, foram realizadas pelos higrômetros em uma vazão aproximada de 500 cm³/min.

3.3.1.3 Resultados

Os valores médios das temperaturas de ponto de orvalho dos higrômetros foram corrigidos através das curvas de correção dos instrumentos, ajustadas por intermédio dos valores declarados nos certificados de calibração.

Baseado no Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (ABNT & INMETRO, 2003), a incerteza expandida foi determinada para cada higrômetro em todos os pontos de medição. As seguintes fontes de incerteza foram utilizadas para o cálculo da incerteza combinada (u): incerteza expandida do higrômetro (U_h), incerteza do ajuste da curva de correção do higrômetro (δ_{ajuste}), o desvio padrão experimental da temperatura de ponto de orvalho média (δ_{tpo}) e a resolução do higrômetro (δ_{rh}), baseada numa distribuição de probabilidade retangular. As duas últimas calibrações dos higrômetros não fornecem subsídios para determinar a deriva dos instrumentos, sendo assim este componente de incerteza não foi considerado. A incerteza expandida (U) foi obtida multiplicando-se a incerteza combinada pelo fator de abrangência $k=2$, fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95%.

$$u = \sqrt{\left(\frac{U_h}{k}\right)^2 + (\delta_{\text{ajuste}})^2 + (\delta_{\text{tpo}})^2 + \left(\frac{\delta_{\text{rh}}}{\sqrt{12}}\right)^2} \quad (42)$$

$$U = u \times k \quad (43)$$

Para o julgamento da qualidade dos resultados de medição, foi utilizado o cálculo do erro normalizado (E_n) em relação a incerteza. Valores de E_n menores do que a unidade indicam que as medições são aceitáveis, ou seja, os higrômetros concordam dentro das suas incertezas expandidas.

$$E_n = \frac{|T_{PR001} - T_{PR002}|}{\sqrt{(U_{PR001})^2 + (U_{PR002})^2}} \quad (44)$$

Onde,

T_{PR001} – Temperatura média do higrômetro PR 001

T_{PR002} – Temperatura média do higrômetro PR 002

U_{PR001} – Incerteza expandida do higrômetro PR 001

U_{PR002} – Incerteza expandida do higrômetro PR 002

As incertezas expandidas determinadas para os higrômetros foram combinadas para compor a incerteza expandida da comparação (U_C).

$$U_C = \sqrt{(U_{PR001})^2 + (U_{PR002})^2} \quad (45)$$

A tabela 3, a seguir, apresenta, para cada ponto, os valores médios de temperatura de ponto de orvalho dos higrômetros, as diferenças entre estes valores (ΔTPO), as incertezas expandidas dos higrômetros, as incertezas da comparação e os erros normalizados.

Tabela 3 – Resultados da comparação dos higrômetros de referência

	T_{PR001}	T_{PR002}	ΔTPO	U_{PR001}	U_{PR002}	U_C	E_n
-40 °C	-38,37	-38,44	0,07	0,07	0,22	0,23	0,3
-30 °C	-28,11	-28,07	0,04	0,07	0,22	0,23	0,2
-20 °C	-20,40	-20,42	0,02	0,07	0,22	0,23	0,1
-10 °C	-9,97	-9,95	0,02	0,15	0,15	0,21	0,1
0 °C	-1,00	-1,00	0,00	0,10	0,13	0,17	0,0
10 °C	10,11	10,13	0,02	0,25	0,24	0,35	0,0
20 °C	18,75	18,74	0,01	0,14	0,14	0,20	0,0

Fonte: Elaboração própria

Todos os valores de E_n foram menores do que 1, o que significa que as medições são aceitáveis, ou seja, os higrômetros concordam dentro das suas incertezas expandidas. A comparação evidencia então a manutenção da confiança no *status* das calibrações dos padrões de referência em umidade.

3.3.2 Termômetros

No caso dos termômetros, padrões de referência em temperatura, a verificação foi realizada através da medição do valor da resistência do sensor a 0 °C (R_0) no ponto do gelo.

3.3.2.1 Execução das medições

Os sensores de resistência de platina, cada um conectado a um canal do indicador digital, foram inseridos em um banho de gelo fundente, produzido a partir de água destilada, acondicionado em vaso *dewar*. Após a estabilização, dez leituras de temperatura, em intervalos de trinta segundos, foram efetuadas para cada sensor e um valor médio de temperatura foi determinado.

A etapa seguinte consistiu em medir os valores de resistência dos sensores inseridos no banho de gelo. Através do indicador digital, ajustado no modo resistência, foram executadas vinte leituras para cada sensor, em intervalos de trinta segundos, e um valor médio de resistência no ponto do gelo foi determinado.

Todavia, é o valor da resistência no ponto triplo da água (0,01 °C) que deve ser configurado no canal de cada sensor e não o valor da resistência no ponto do gelo. Sendo assim, a equação de Callendar descrita, a seguir, para a faixa de 0 °C a 650 °C, foi utilizada para calcular, para cada sensor, o valor de resistência no ponto triplo da água ($R_{0,01}$).

$$R_{0,01} = R_0 \times [1 + A \times t + B \times t^2] \quad (46)$$

Onde,

$R_{0,01}$ – Resistência no ponto triplo da água

R_0 – Resistência no ponto do gelo

t – Temperatura sobre a Escala de Internacional de Temperatura de 1990

$$A = 3,9083 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B = -5,775 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Os valores de resistência no ponto triplo da água que estavam configurados nos canais dos sensores foram então substituídos pelos valores de resistência no ponto triplo da água calculados conforme a equação 46 descrita anteriormente.

Com os sensores inseridos em um banho de gelo fundente, sessenta leituras de temperatura, em intervalos de trinta segundos, foram efetuadas para cada sensor, através do indicador digital, e um novo valor médio de temperatura foi obtido.

É importante destacar que todos os sensores de temperatura foram inseridos por inteiro no banho de gelo e que, antes da inserção, os mesmos foram limpos com toalhas de papel umedecidas com álcool para remoção de gordura e impurezas, de modo a evitar a contaminação do gelo moído do banho.

3.3.2.2 Resultados

Os sensores de resistência de platina foram verificados quanto ao R_0 duas vezes durante a elaboração deste trabalho. A primeira verificação foi realizada alguns dias antes da execução das medições de temperatura na câmara climática. A tabela 4 e a figura 34, a seguir, apresentam as temperaturas médias dos sensores com os valores de $R_{0,01}$ que estavam ajustados no indicador digital (T_1) e as temperaturas médias dos sensores com os valores de $R_{0,01}$ determinados quando da realização do ponto do gelo (T_2).

Tabela 4 – Temperaturas médias antes (T_1) e após (T_2) os novos valores de $R_{0,01}$ (1ª verificação)

Canal do Indicador	Nº de Série do Sensor	T_1 ($^\circ\text{C}$)	T_2 ($^\circ\text{C}$)
3	1567/97	-0,0116	-0,0013
4	1570/97	0,0021	-0,0015
5	1569/97	0,0047	-0,0017
11	2426/97	0,0009	-0,0083
12	3014/97	0,0024	-0,0018
13	0173/97	0,0005	0,0097
14	0174/97	-0,0262	0,0015
15	0175/97	-0,0068	0,0008
16	0176/97	-0,0083	0,0000

Fonte: Elaboração própria

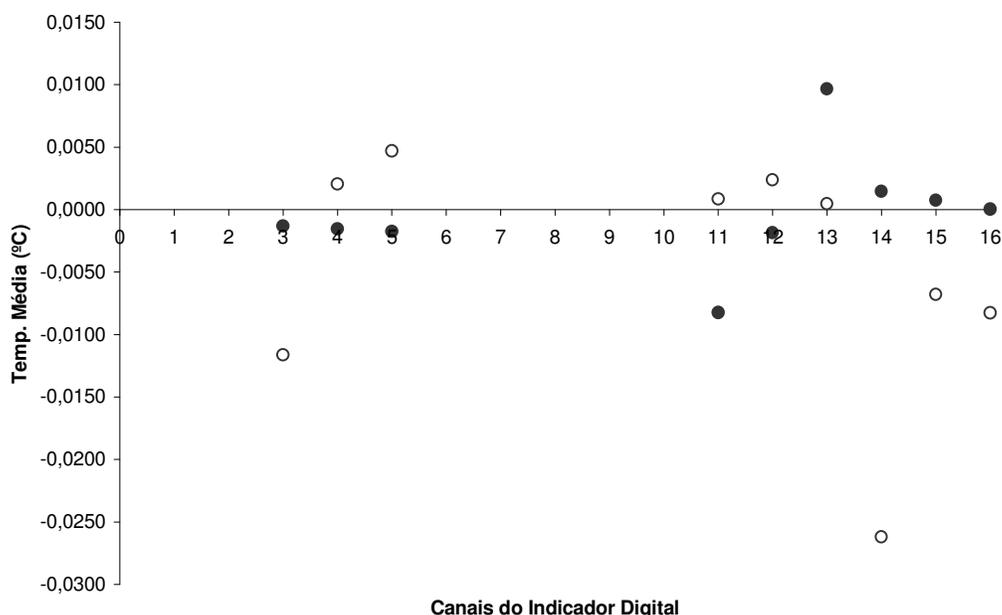


Figura 34 – Temperaturas médias antes (○) e após (●) os novos valores de $R_{0,01}$ (1ª verificação)
 Fonte: Elaboração própria

Com exceção dos sensores de temperatura 2426/97 e 0173/97, os demais apresentaram temperaturas mais próximas à temperatura do ponto do gelo ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$) com os valores de $R_{0,01}$ que foram determinados quando da realização do ponto do gelo do que com os valores de $R_{0,01}$ que estavam anteriormente ajustados no indicador digital. Sendo assim, os valores de $R_{0,01}$ que foram determinados quando da realização do ponto do gelo foram mantidos no menu de configuração dos canais destes sensores. No caso dos sensores 2426/97 e 0173/97, os valores de $R_{0,01}$ que estavam inicialmente ajustados no indicador digital retornaram ao menu de configuração dos canais dos sensores.

Para cada sensor, foi calculada a incerteza propagada devido à variação da calibração (u_{vc}) através da raiz quadrada do produto da soma quadrática das contribuições pela razão de resistência $[W(t)]$. As contribuições utilizadas foram as seguintes: incerteza de $0,002\text{ }^{\circ}\text{C}$ na realização do ponto do gelo (δ_{pg}), equivalente a meia largura de uma distribuição de probabilidade retangular (SANTOS & PETKOVIC, 2003); resolução do indicador digital (δ_{rt}), baseada numa distribuição de probabilidade retangular; desvio padrão experimental da temperatura média (δ_t); e estabilidade do sensor (δ_{est}), equivalente a meia largura de uma distribuição de probabilidade retangular. A estabilidade de cada sensor foi obtida através da diferença entre as temperaturas médias medidas com o $R_{0,01}$ que estava inicialmente

ajustado no indicador e com o $R_{0,01}$ que foi obtido quando da realização do ponto do gelo. A razão de resistência $[W(t)]$, que equivale a razão entre a resistência numa temperatura (R_t) pela resistência no ponto triplo da água ($R_{0,01}$), foi calculada através da equação de Callendar (equação 46) para a temperatura mais alta medida neste trabalho (70 °C).

$$u_{vc} = \sqrt{\left[\left(\frac{\delta_{pg}}{\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{\delta_{rt}}{\sqrt{12}} \right)^2 + (\delta_t)^2 + \left(\frac{\delta_{est}}{\sqrt{3}} \right)^2 \right]} \times W(t) \quad (47)$$

A tabela 5, a seguir, apresenta, para cada sensor, a incerteza na realização do ponto do gelo (δ_{pg}), a resolução do indicador (δ_{rt}), o desvio padrão experimental da temperatura média (δ_t), a estabilidade do sensor (δ_{est}), a razão de resistência calculada $[W(t)]$ e a incerteza propagada devido à variação da calibração do sensor de temperatura (u_{vc}).

Tabela 5 – Incerteza propagada devido à variação da calibração do sensor (°C) (1ª verificação)

Nº de Série do Sensor	δ_{pg}	δ_{rt}	δ_t	δ_{est}	W(t)	u_{vc}
1567/97	0,002	0,0001	0,0001	0,0103	1,271	0,0068
1570/97	0,002	0,0001	0,0001	0,0036	1,271	0,0027
1569/97	0,002	0,0001	0,0001	0,0064	1,271	0,0044
2426/97	0,002	0,0001	0,0001	0,0092	1,271	0,0061
3014/97	0,002	0,0001	0,0001	0,0042	1,271	0,0030
0173/97	0,002	0,0001	0,0003	0,0092	1,271	0,0061
0174/97	0,002	0,0001	0,0001	0,0277	1,271	0,0181
0175/97	0,002	0,0001	0,0001	0,0076	1,271	0,0051
0176/97	0,002	0,0001	0,0001	0,0083	1,271	0,0056

Fonte: Elaboração própria

A segunda verificação foi realizada alguns dias antes da execução das medições de temperatura e umidade na câmara climática. A tabela 6 e a figura 35, a seguir, apresentam as temperaturas médias dos sensores com os valores de $R_{0,01}$ que estavam ajustados no indicador digital (T_1) e as temperaturas médias dos sensores com os valores de $R_{0,01}$ determinados quando da realização do ponto do gelo (T_2).

Tabela 6 – Temperaturas médias antes (T_1) e após (T_2) os novos valores de $R_{0,01}$ (2ª verificação)

Canal do Indicador	Nº de Série do Sensor	T_1 (°C)	T_2 (°C)
3	1567/97	-0,0069	0,0004
4	1570/97	0,0025	-0,0018
5	1569/97	-0,0031	-0,0012
11	2426/97	0,0020	0,0000
12	3014/97	0,0047	0,0000
13	0173/97	-0,0029	0,0002
14	0174/97	0,0028	0,0000
15	0175/97	0,0002	0,0002
16	0176/97	0,0029	0,0002

Fonte: Elaboração própria

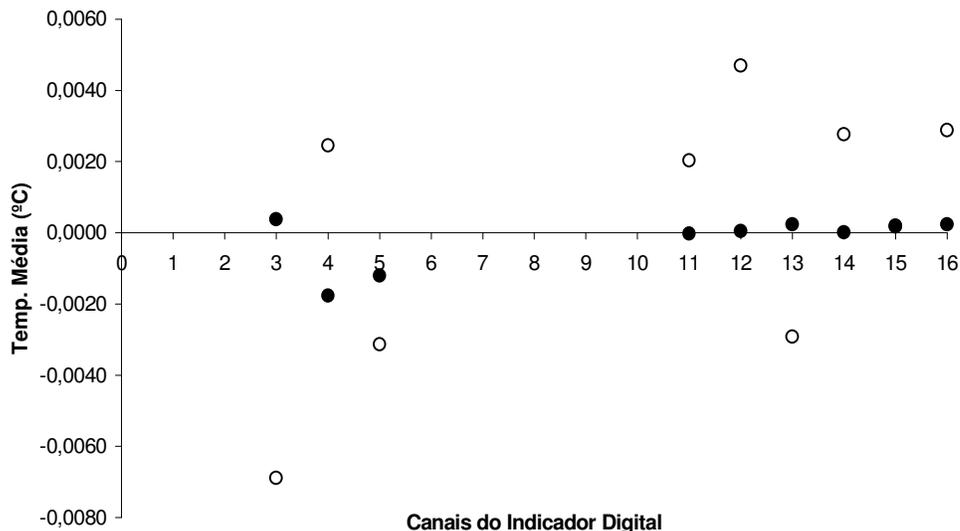


Figura 35 – Temperaturas médias antes (O) e após (●) os novos valores de $R_{0,01}$ (2ª verificação)
Fonte: Elaboração própria

Todos os sensores de resistência de platina apresentaram temperaturas mais próximas à temperatura do ponto do gelo (0 °C) com os valores de $R_{0,01}$ que foram determinados quando da realização do ponto do gelo do que com os valores de $R_{0,01}$ que estavam anteriormente ajustados no indicador digital. Desta forma, os valores de $R_{0,01}$ que foram determinados quando da realização do ponto do gelo foram mantidos no menu de configuração dos canais destes sensores.

A incerteza propagada devido à variação da calibração do sensor de temperatura (u_{vc}) foi calculada para cada sensor através da equação 47. A tabela 7, a seguir, apresenta, para cada sensor, a incerteza na realização do ponto do gelo

(δ_{pg}), a resolução do indicador (δ_{rt}), o desvio padrão experimental da temperatura média (δ_t), a estabilidade do sensor (δ_{est}), a razão de resistência calculada [W(t)] e a incerteza propagada devido à variação da calibração do sensor de temperatura (u_{vc}).

Tabela 7 – Incerteza propagada devido à variação da calibração do sensor ($^{\circ}\text{C}$) (2^a verificação)

Nº de Série do Sensor	δ_{pg}	δ_{rt}	δ_t	δ_{est}	W(t)	u_{vc}
1567/97	0,002	0,0001	0,0001	0,0073	1,271	0,0049
1570/97	0,002	0,0001	0,0001	0,0043	1,271	0,0031
1569/97	0,002	0,0001	0,0001	0,0019	1,271	0,0018
2426/97	0,002	0,0001	0,0000	0,0020	1,271	0,0018
3014/97	0,002	0,0001	0,0000	0,0047	1,271	0,0033
0173/97	0,002	0,0001	0,0000	0,0031	1,271	0,0024
0174/97	0,002	0,0001	0,0001	0,0028	1,271	0,0022
0175/97	0,002	0,0001	0,0001	0,0000	1,271	0,0013
0176/97	0,002	0,0001	0,0001	0,0027	1,271	0,0022

Fonte: Elaboração própria

3.4 SISTEMA DE MEDIÇÃO

3.4.1 Definição do espaço de trabalho

Para a montagem do sistema de medição no interior da câmara climática, foi definida uma região, denominada espaço de trabalho, com volume de $0,116 \text{ m}^3$. O espaço de trabalho, que possui as seguintes dimensões 540 mm de altura x 430 mm de largura x 500 mm de profundidade, representa 38,6% do volume interno total da câmara ($0,301 \text{ m}^3$). As dimensões do espaço de trabalho foram definidas para atender as necessidades do laboratório quando da utilização da câmara climática para a realização dos serviços de calibração dos instrumentos de medição de umidade e temperatura. 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.

3.4.2 Quantidade e posicionamento dos sensores

Para a execução das medições de temperatura, os nove sensores de resistência de platina foram posicionados um em cada canto do espaço de trabalho e um no centro.

Para a execução das medições de umidade, um higrômetro de ponto de orvalho foi utilizado. O higrômetro 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 centro do espaço de trabalho foi posicionado no centro do espaço interno da câmara climática. A figura 36, a seguir, mostra a representação do espaço de trabalho no interior do câmara.

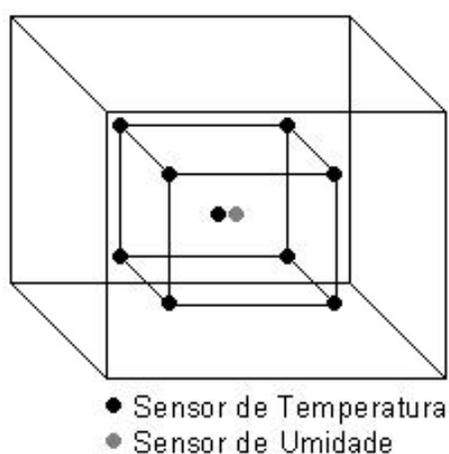


Figura 36 – Espaço de trabalho no interior da câmara
Fonte: Elaboração própria

A tabela 8, a seguir, apresenta a identificação e a localização dos sensores de temperatura na composição do espaço de trabalho.

Tabela 8 – Identificação e localização dos termômetros

Nº	Canal do Indicador Digital	Nº de Série do Sensor	Localização	
			Plano	Extremidade
01	Canal 3	1567/97	Frontal (PF)	Superior Esquerdo (SE)
02	Canal 4	1570/97	Frontal (PF)	Superior Direito (SD)
03	Canal 5	1569/97	Frontal (PF)	Inferior Direito (ID)
04	Canal 11	2426/97	Frontal (PF)	Inferior Esquerdo (IE)

Nº	Canal do Indicador Digital	Nº de Série do Sensor	Localização	
			Plano	Extremidade
05	Canal 12	3014/97	Centro do Espaço de Trabalho (C)	
06	Canal 13	0173/97	Traseiro (PT)	Superior Esquerdo (SE)
07	Canal 14	0174/97	Traseiro (PT)	Superior Direito (SD)
08	Canal 15	0175/97	Traseiro (PT)	Inferior Direito (ID)
09	Canal 16	0176/97	Traseiro (PT)	Inferior Esquerdo (IE)

Fonte: Elaboração própria

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 37, a seguir, mostra as distâncias dos sensores entre si e entre as paredes da câmara climática.

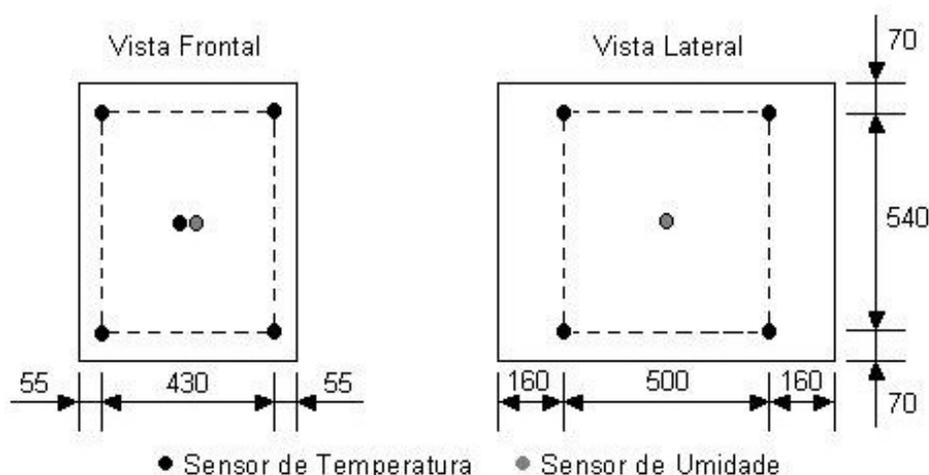


Figura 37 – Posicionamentos dos sensores no interior da câmara (dimensões em mm)

Fonte: Elaboração própria

A condução do ar gerado pela câmara climática para o higrômetro de ponto de orvalho foi feita através de um sistema de amostragem composto pela bomba de sucção do próprio instrumento, do tipo diafragma, e por tubulações. Foi utilizada a tubulação fornecida com o higrômetro, até a entrada lateral da câmara, e tubo de teflon no seu interior. A ligação da tubulação do instrumento com o tubo de teflon foi feita com uma união de aço inoxidável.

Tubulações de plásticos macios, como borracha, devem ser evitadas, pois estes materiais são altamente higroscópicos. Porém, tubulações de plásticos rígidos,

como nylon, teflon e polipropileno, podem ser utilizadas para muitas medições. Para temperaturas de ponto de orvalho abaixo de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, somente tubulações de aço inoxidável devem ser utilizadas (WIEDERHOLD, 1997). Desta forma, os componentes do sistema de amostragem são adequados para o uso pretendido.

Os sensores de temperatura e a extremidade do sistema de amostragem do higrômetro foram posicionados na câmara por meio de garras ajustadas em hastes. Após a fixação, todos os sensores de temperatura foram limpos com toalhas de papel umedecidas com álcool para remoção de gordura e impurezas.

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 quantidade, o posicionamento e as distâncias dos sensores para as paredes internas da câmara climática atendem aos requisitos mínimos definidos nos documentos: NF X15-140 (AFNOR, 2002), IEC 60068-3-5 (IEC, 2001), IEC 60068-3-6 (IEC, 2001), DKD-R 5-7 (DKD, 2004) e *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003). As figuras 38 e 39, a seguir, mostram a montagem do sistema de medição no interior da câmara.



Figura 38 – Sistema de medição no interior da câmara
Fonte: Elaboração própria



Figura 39 – Sistema de medição no interior da câmara
Fonte: Elaboração própria

3.5 EXECUÇÃO DAS MEDIÇÕES

3.5.1 Pontos selecionados

A avaliação da câmara climática foi realizada nos 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 e nos pontos de umidade relativa 30 %ur, 45 %ur, 60 %ur, 75 %ur e 90 %ur. 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.

Os pontos selecionados, especialmente os de temperatura, representam a faixa onde grande parte dos serviços de calibração prestados pelo laboratório são executados.

3.5.2 Quantidade e intervalo entre medições

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).

Tanto o número de medidas quanto o intervalo entre estas atendem aos requisitos definidos na norma NF X15-140 (AFNOR, 2002) e nos guias DKD-R 5-7 (DKD, 2004) e *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003).

As figuras 40, 41, 42 e 43, a seguir, mostram medições de temperatura e umidade relativa no interior da câmara.

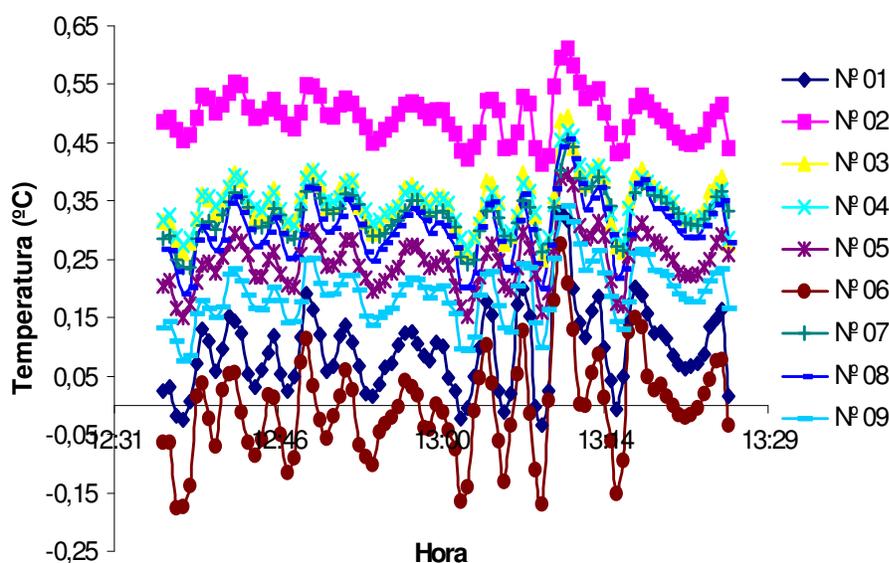


Figura 40 – Medições de temperatura no interior da câmara (0 °C)
Fonte: Elaboração própria

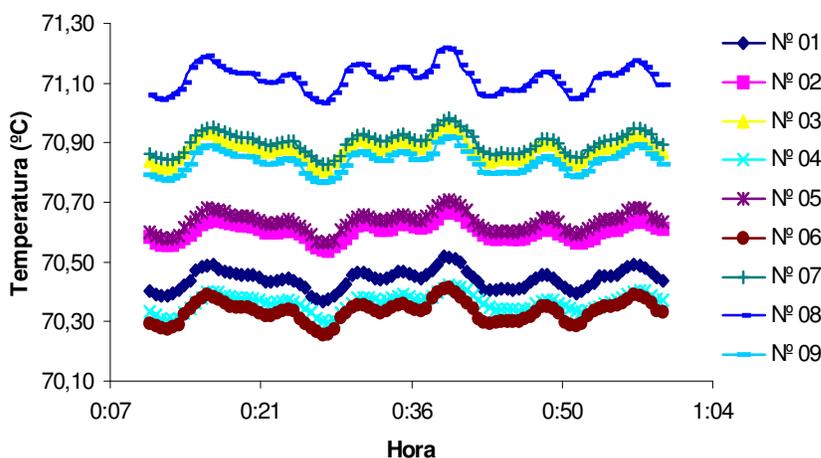


Figura 41 – Medições de temperatura no interior da câmara (70 °C)
Fonte: Elaboração própria

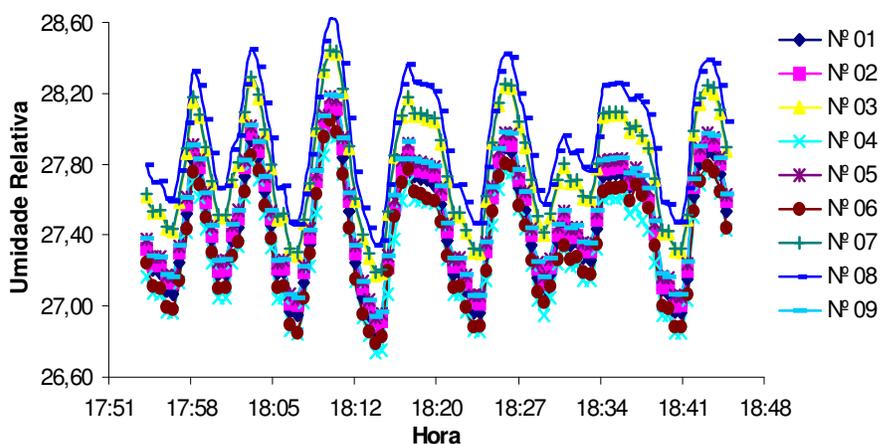


Figura 42 – Medições de umidade relativa no interior da câmara (30 %ur)
Fonte: Elaboração própria

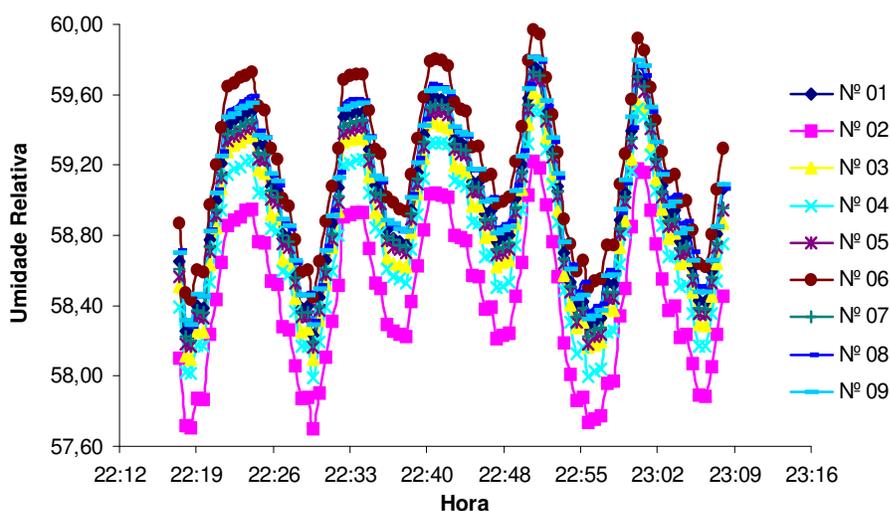


Figura 43 – Medições de umidade relativa no interior da câmara (60 %ur)
Fonte: Elaboração própria

3.5.3 Automação dos instrumentos

Todo o processo de medição foi feito por meio da aquisição automática dos dados. No caso dos termômetros, o indicador digital de temperatura foi conectado a um computador por meio de sua saída RS-232 e, através de um *software* desenvolvido na Divisão de Metrologia Térmica do INMETRO (DITER), as medições de temperatura foram obtidas e armazenadas. Já a aquisição dos dados do higrômetro e da câmara climática foi feita pelo multímetro que foi conectado a um computador por meio de sua saída RS-232 e, através de um *software* desenvolvido e disponibilizado pelo fabricante, as medições foram obtidas e armazenadas.

Todo o processo de ajuste da câmara climática foi feito automaticamente. A câmara foi conectada a um computador, por meio de sua saída RS-232 e, através de um *software* desenvolvido e disponibilizado pelo fabricante, foi elaborada uma programação definindo a seqüência dos pontos na ordem crescente e o tempo de duas horas e meia de duração para cada um.

Os dois computadores utilizados, um para o indicador digital de temperatura e ou outro para o multímetro, tiveram seus relógios sincronizados antes do início das medições para garantir o sincronismo de todas as leituras.

A automação do processo de medição e de controle da câmara climática proporciona diversas vantagens, tais como: redução do trabalho humano; otimização do tempo de medição, visto que todo o aparato pode permanecer em operação durante vinte e quatro horas durante vários dias; confiabilidade das medições, pois elimina a possibilidade de registros incorretos e a garantia do sincronismo das medições.

3.5.4 Preparação do higrômetro

As amostras de ar geradas pela câmara foram conduzidas por sucção ao higrômetro com uma vazão de 700 cm³/min. O ajuste da vazão foi feito através da regulagem da freqüência e do ciclo de trabalho do dispositivo.

Antes do início das medições de temperatura de ponto de orvalho, uma verificação no espelho do higrômetro foi realizada. Ao acionar a função de verificação do espelho (*Mirror Check Control*), o higrômetro aquece o espelho para evaporação do condensado, busca por contaminação e a compensa, se necessário. A verificação do espelho tem por objetivo compensar o efeito da contaminação que ocorre progressivamente nos componentes ópticos do sensor para evitar perda de sensibilidade.

3.6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.6.1 Valores médios de temperatura

A temperatura média de referência de cada local de medição (T_i) foi obtida calculando-se a média das noventa medidas. Já a temperatura média de referência

do espaço de trabalho (T) foi determinada calculando-se a média das temperaturas médias de referência dos locais de medição. A temperatura média da câmara (T_c) foi determinada calculando-se a média de suas noventa medições de temperatura.

As tabelas 9 e 10, a seguir, mostram as temperaturas médias de referência dos locais de medição, as temperaturas médias de referência do espaço de trabalho e as temperaturas médias da câmara. As temperaturas médias máximas e mínimas dos locais de medição estão em negrito.

Tabela 9 – Valores médios de temperatura ($^{\circ}\text{C}$): 0 $^{\circ}\text{C}$ a 30 $^{\circ}\text{C}$

Nº	Local	0 $^{\circ}\text{C}$	5 $^{\circ}\text{C}$	10 $^{\circ}\text{C}$	15 $^{\circ}\text{C}$	20 $^{\circ}\text{C}$	25 $^{\circ}\text{C}$	30 $^{\circ}\text{C}$
01	PF – SE	0,095	5,446	10,441	15,474	20,486	25,513	30,578
02	PF – SD	0,496	5,622	10,604	15,630	20,620	25,614	30,655
03	PF – ID	0,346	5,445	10,459	15,515	20,535	25,549	30,626
04	PF – IE	0,346	5,589	10,550	15,553	20,537	25,536	30,583
05	C	0,247	5,472	10,468	15,502	20,510	25,525	30,599
06	PT – SE	-0,004	5,405	10,395	15,418	20,429	25,460	30,558
07	PT – SD	0,326	5,423	10,433	15,485	20,499	25,513	30,588
08	PT – ID	0,305	5,343	10,366	15,435	20,469	25,489	30,568
09	PT – IE	0,192	5,419	10,424	15,462	20,475	25,496	30,583
T		0,261	5,463	10,460	15,497	20,507	25,522	30,593
T_c		0,24	5,13	10,07	15,14	20,08	25,08	30,04

Fonte: Elaboração própria

Tabela 10 – Valores médios de temperatura ($^{\circ}\text{C}$): 35 $^{\circ}\text{C}$ a 70 $^{\circ}\text{C}$

Nº	Local	35 $^{\circ}\text{C}$	40 $^{\circ}\text{C}$	45 $^{\circ}\text{C}$	50 $^{\circ}\text{C}$	55 $^{\circ}\text{C}$	60 $^{\circ}\text{C}$	65 $^{\circ}\text{C}$	70 $^{\circ}\text{C}$
01	PF – SE	35,602	40,655	45,652	50,634	55,582	60,525	65,472	70,441
02	PF – SD	35,652	40,666	45,660	50,672	55,650	60,621	65,602	70,604
03	PF – ID	35,642	40,679	45,706	50,760	55,784	60,800	65,829	70,878
04	PF – IE	35,589	40,617	45,597	50,570	55,509	60,448	65,395	70,362
05	C	35,616	40,660	45,669	50,683	55,664	60,640	65,625	70,634
06	PT – SE	35,593	40,660	45,653	50,613	55,539	60,460	65,384	70,334
07	PT – SD	35,603	40,642	45,674	50,739	55,772	60,800	65,840	70,900
08	PT – ID	35,586	40,631	45,685	50,792	55,864	60,931	66,014	71,117
09	PT – IE	35,608	40,662	45,691	50,735	55,750	60,762	65,788	70,837
T		35,610	40,652	45,665	50,689	55,680	60,665	65,661	70,678
T_c		35,04	39,98	45,03	49,97	54,91	59,92	64,87	69,91

Fonte: Elaboração própria

3.6.2 Valores médios de umidade relativa

A umidade relativa de referência em 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. Foram utilizadas as equações 29 e 35 para os cálculos dos valores de pressão do vapor d'água e dos valores de umidade relativa, respectivamente.

A umidade relativa média de referência de cada local de medição (UR_i) foi determinada calculando-se a média das noventa medidas. Já a umidade relativa média de referência do espaço de trabalho (UR) foi determinada calculando-se a média dos valores médios de umidade relativa de referência dos locais de medição. A umidade relativa média da câmara (UR_C) foi determinada calculando-se a média de suas noventa medições de umidade relativa.

A tabela 11, a seguir, mostra os valores médios de umidade relativa de referência dos locais de medição, os valores médios de umidade relativa de referência do espaço de trabalho e os valores médios de umidade relativa da câmara climática. Os valores médios máximos e mínimos de umidade relativa dos locais de medição estão em negrito.

Tabela 11 – Valores médios de umidade relativa (%ur)

Nº	Local	30 %ur	45 %ur	60 %ur	75 %ur	90 %ur
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

Fonte: Elaboração própria

3.6.3 Variações de temperatura no espaço

3.6.3.1 Conforme a norma da AFNOR

As variações de temperatura no espaço, conforme a norma NF X15-140 (AFNOR, 2002), foram obtidas através dos cálculos dos gradientes de temperatura e dos gradientes máximos de temperatura por intermédio das equações 1 e 2, respectivamente.

O sistema de medição de temperatura de cada local de medição do espaço de trabalho é composto pelo sensor e pelo indicador. A incerteza combinada do sistema de medição de temperatura (u_{st}) foi então calculada levando-se em consideração a incerteza combinada do termômetro (u_t), a incerteza propagada devido à variação da calibração do sensor de temperatura (u_{vc}) e a resolução do indicador digital (δ_{rt}), baseada numa distribuição de probabilidade retangular. Já a incerteza expandida do sistema de medição de temperatura (U_{st}) foi calculada multiplicando-se a incerteza combinada pelo fator de abrangência $k=2$, o que fornece uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

$$u_{st} = \sqrt{(u_t)^2 + (u_{vc})^2 + \left(\frac{\delta_{rt}}{\sqrt{12}}\right)^2} \quad (48)$$

$$U_{st} = k \times u_{st} \quad (49)$$

A incerteza combinada (u_t) de cada termômetro foi obtida dividindo-se a incerteza expandida (U_t) pelo fator de abrangência (k) declarado no certificado de calibração. A tabela 12, a seguir, apresenta as incertezas expandidas dos termômetros, os fatores de abrangência e as incertezas combinadas calculadas.

Tabela 12 – Incertezas dos termômetros

Nº de Série	U_t (°C)	K	u_t (°C)
1567/97	0,053	2,0	0,0265
1570/97	0,030	2,0	0,0150
1569/97	0,038	2,0	0,0190
2426/97	0,043	2,0	0,0215
3014/97	0,037	2,0	0,0185

Nº de Série	U_t (°C)	K	u_t (°C)
0173/97	0,050	2,0	0,0250
0174/97	0,047	2,0	0,0235
0175/97	0,049	2,0	0,0245
0176/97	0,039	2,0	0,0195

Fonte: Elaboração própria

A tabela 13, a seguir, apresenta, para cada local de medição, a incerteza combinada do termômetro (u_t); a incerteza propagada devido à variação da calibração do sensor de temperatura (u_{vc}), quando da primeira verificação do sensor; a resolução do indicador digital (δ_{rt}) e as incertezas combinada (u_{st}) e expandida (U_{st}) do sistema de medição de temperatura.

Tabela 13 – Incertezas dos sistemas de medição de temperatura (°C)

Local de Medição	Nº de Série do Sensor	u_t	u_{vc}	δ_{rt}	u_{st}	U_{st}
01	1567/97	0,0265	0,0068	0,0001	0,027	0,055
02	1570/97	0,0150	0,0027	0,0001	0,015	0,030
03	1569/97	0,0190	0,0044	0,0001	0,019	0,039
04	2426/97	0,0215	0,0061	0,0001	0,022	0,045
05	3014/97	0,0185	0,0030	0,0001	0,019	0,037
06	0173/97	0,0250	0,0061	0,0001	0,026	0,051
07	0174/97	0,0235	0,0181	0,0001	0,030	0,059
08	0175/97	0,0245	0,0051	0,0001	0,025	0,050
09	0176/97	0,0195	0,0056	0,0001	0,020	0,041

Fonte: Elaboração própria

Os desvios padrões experimentais de temperatura (s_t) foram determinados, através da equação 10, e os resultados estão apresentados nas tabelas 14 e 15, a seguir.

Tabela 14 – Desvios padrões de temperatura (°C): 0 °C a 30 °C

Nº	0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
01	0,0714	0,0278	0,0219	0,0464	0,0237	0,0221	0,0282
02	0,0387	0,0189	0,0170	0,0425	0,0220	0,0177	0,0266
03	0,0467	0,0252	0,0223	0,0438	0,0228	0,0221	0,0260
04	0,0406	0,0202	0,0138	0,0446	0,0224	0,0164	0,0251
05	0,0469	0,0230	0,0177	0,0442	0,0222	0,0193	0,0271
06	0,0850	0,0323	0,0240	0,0489	0,0261	0,0255	0,0304

Nº	0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
07	0,0411	0,0219	0,0191	0,0435	0,0222	0,0205	0,0270
08	0,0526	0,0294	0,0273	0,0446	0,0241	0,0268	0,0283
09	0,0509	0,0242	0,0183	0,0456	0,0227	0,0199	0,0271

Fonte: Elaboração própria

Tabela 15 – Desvios padrões de temperatura (°C): 35 °C a 70 °C

Nº	35 °C	40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C	65 °C	70 °C
01	0,0253	0,0230	0,0167	0,0234	0,0544	0,0515	0,0373	0,0337
02	0,0218	0,0171	0,0139	0,0187	0,0469	0,0442	0,0318	0,0286
03	0,0249	0,0222	0,0193	0,0241	0,0525	0,0514	0,0375	0,0356
04	0,0204	0,0169	0,0124	0,0196	0,0498	0,0479	0,0316	0,0287
05	0,0225	0,0194	0,0160	0,0220	0,0526	0,0497	0,0357	0,0326
06	0,0289	0,0266	0,0184	0,0247	0,0573	0,0530	0,0382	0,0357
07	0,0239	0,0207	0,0181	0,0236	0,0528	0,0518	0,0381	0,0357
08	0,0281	0,0270	0,0258	0,0300	0,0578	0,0581	0,0433	0,0443
09	0,0237	0,0206	0,0188	0,0250	0,0550	0,0536	0,0382	0,0368

Fonte: Elaboração própria

As incertezas expandidas associadas às temperaturas médias de referência dos locais de medição (U_{T1}) foram calculadas através da equação 12, utilizando-se fator de abrangência $k=2$, o que fornece uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. Os resultados estão apresentados nas tabelas 16 e 17, a seguir.

Tabela 16 – Incertezas expandidas das temperaturas médias de referência dos locais de medição (°C): 0 °C a 30 °C

Nº	0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
01	0,153	0,078	0,070	0,108	0,072	0,070	0,079
02	0,083	0,048	0,046	0,090	0,054	0,047	0,061
03	0,101	0,064	0,059	0,096	0,060	0,059	0,065
04	0,093	0,060	0,053	0,100	0,063	0,056	0,067
05	0,101	0,059	0,052	0,096	0,058	0,054	0,066
06	0,178	0,083	0,070	0,110	0,073	0,072	0,080
07	0,101	0,074	0,071	0,105	0,074	0,072	0,080
08	0,117	0,077	0,074	0,102	0,069	0,073	0,076
09	0,110	0,063	0,055	0,100	0,061	0,057	0,068

Fonte: Elaboração própria

Tabela 17 – Incertezas expandidas das temperaturas médias de referência dos locais de medição (°C): 35 °C a 70 °C

Nº	35 °C	40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C	65 °C	70 °C
01	0,074	0,071	0,064	0,072	0,122	0,117	0,093	0,087
02	0,053	0,046	0,041	0,048	0,099	0,094	0,071	0,065
03	0,063	0,059	0,055	0,062	0,112	0,110	0,085	0,081
04	0,061	0,056	0,051	0,059	0,109	0,106	0,077	0,073
05	0,059	0,054	0,049	0,058	0,112	0,106	0,081	0,075
06	0,077	0,074	0,063	0,071	0,126	0,118	0,092	0,088
07	0,076	0,072	0,069	0,076	0,121	0,119	0,097	0,093
08	0,075	0,074	0,072	0,078	0,126	0,126	0,100	0,102
09	0,062	0,058	0,055	0,064	0,117	0,115	0,086	0,084

Fonte: Elaboração própria

As tabelas 18 e 19, a seguir, apresentam, para cada ponto, a temperatura média de referência local máxima ($T_{I \max}$), a temperatura média de referência local mínima ($T_{I \min}$), a incerteza expandida associada à temperatura média de referência local máxima ($U_{T_{I \max}}$), a incerteza expandida associada à temperatura média de referência local mínima ($U_{T_{I \min}}$) e o gradiente de temperatura (HT).

Tabela 18 – Gradientes de temperatura (°C): 0 °C a 30 °C

	0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
$T_{I \max}$	0,496	5,622	10,604	15,630	20,620	25,614	30,655
$T_{I \min}$	-0,004	5,343	10,366	15,418	20,429	25,460	30,558
$U_{T_{I \max}}$	0,083	0,048	0,046	0,090	0,054	0,047	0,061
$U_{T_{I \min}}$	0,178	0,077	0,074	0,110	0,073	0,072	0,080
HT (°C)	0,761	0,404	0,358	0,412	0,318	0,273	0,238

Fonte: Elaboração própria

Tabela 19 – Gradientes de temperatura (°C): 35 °C a 70 °C

	35 °C	40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C	65 °C	70 °C
$T_{I \max}$	35,652	40,679	45,706	50,792	55,864	60,931	66,014	71,117
$T_{I \min}$	35,586	40,617	45,597	50,570	55,509	60,448	65,384	70,334
$U_{T_{I \max}}$	0,053	0,059	0,055	0,078	0,126	0,126	0,100	0,102
$U_{T_{I \min}}$	0,075	0,056	0,051	0,059	0,109	0,106	0,092	0,088
HT (°C)	0,194	0,177	0,215	0,359	0,590	0,715	0,822	0,973

Fonte: Elaboração própria

Os gradientes máximos de temperatura foram então calculados utilizando-se a equação 2. As tabelas 20 e 21, a seguir, apresentam, para cada ponto, a

temperatura máxima (t_{\max}), a temperatura mínima (t_{\min}), a incerteza expandida do sistema de medição de temperatura que indicou a temperatura máxima ($U_{\text{st max}}$), a incerteza expandida do sistema de medição de temperatura que indicou a temperatura mínima ($U_{\text{st min}}$) e o gradiente máximo de temperatura (HT_M).

Tabela 20 – Gradientes máximos de temperatura (°C): 0 °C a 30 °C

	0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
t_{\max}	0,612	5,666	10,639	15,715	20,673	25,650	30,730
t_{\min}	-0,176	5,273	10,314	15,329	20,384	25,415	30,493
$U_{\text{st max}}$	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
$U_{\text{st min}}$	0,051	0,050	0,050	0,051	0,051	0,051	0,051
HT_M (°C)	0,869	0,473	0,405	0,467	0,370	0,316	0,318

Fonte: Elaboração própria

Tabela 21 – Gradientes máximos de temperatura (°C): 35 °C a 70 °C

	35 °C	40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C	65 °C	70 °C
t_{\max}	35,688	40,724	45,752	50,850	55,962	61,049	66,105	71,217
t_{\min}	35,517	40,566	45,571	50,520	55,397	60,357	65,310	70,256
$U_{\text{st max}}$	0,030	0,039	0,039	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
$U_{\text{st min}}$	0,050	0,050	0,045	0,045	0,045	0,051	0,051	0,051
HT_M (°C)	0,251	0,247	0,265	0,425	0,660	0,793	0,896	1,062

Fonte: Elaboração própria

3.6.3.2 Conforme o guia do DKD

As variações de temperatura no espaço, conforme o guia DKD-R 5-7 (DKD, 2004), foram obtidas através da determinação dos valores de não homogeneidade espacial, que consiste na maior diferença de temperatura entre um local de medição e o local de referência, que neste caso é o centro do espaço de trabalho. As tabelas 22 e 23, a seguir, mostram os valores de não homogeneidade espacial de temperatura (δT_{inhom}).

Tabela 22 – Não homogeneidade espacial de temperatura: 0 °C a 30 °C

	0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
δT_{inhom} (°C)	0,343	0,172	0,151	0,144	0,121	0,099	0,074

Fonte: Elaboração própria

Tabela 23 – Não homogeneidade espacial de temperatura: 35 °C a 70 °C

	35 °C	40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C	65 °C	70 °C
δT_{inhom} (°C)	0,050	0,056	0,083	0,141	0,242	0,325	0,409	0,524

Fonte: Elaboração própria

3.6.3.3 Conforme o guia do SEE

As variações de temperatura no espaço, conforme o guia *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003), 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 tabelas 24 e 25, a seguir, apresentam os valores dos gradientes.

Tabela 24 – Gradientes de temperatura (°C): 0 °C a 30 °C

0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
0,189	0,100	0,084	0,077	0,064	0,052	0,040

Fonte: Elaboração própria

Tabela 25 – Gradientes de temperatura (°C): 35 °C a 70 °C

35 °C	40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C	65 °C	70 °C
0,029	0,024	0,040	0,085	0,134	0,178	0,228	0,283

Fonte: Elaboração própria

3.6.4 Variações de umidade relativa no espaço

3.6.4.1 Conforme a norma da AFNOR

As variações de umidade relativa no espaço, conforme a norma NF X15-140 (AFNOR, 2002), foram obtidas através dos cálculos dos gradientes de umidade relativa e dos gradientes máximos de umidade relativa por meio das equações 3 e 4, respectivamente.

O sistema de medição de umidade relativa de cada local de medição do espaço de trabalho é composto pelo sensor de temperatura e seu indicador e pelo higrômetro de ponto de orvalho. A incerteza combinada do sistema de medição de umidade relativa (u_{sur}) foi então calculada levando-se em consideração a incerteza

combinada do termômetro (u_t); a incerteza propagada devido à variação da calibração do sensor de temperatura (u_{vc}); a incerteza combinada do higrômetro (u_h); as resoluções do indicador digital de temperatura (δ_{rt}) e do higrômetro (δ_{rh}), baseadas numa distribuição de probabilidade retangular, e a incerteza do ajuste da curva de correção do higrômetro (δ_{ajuste}) eqüivalente a 0,021 °C, valor previamente calculado pelo LAHIG por meio de métodos estatísticos. As duas últimas calibrações do higrômetro não fornecem subsídios para determinar a deriva do instrumento, sendo assim este componente de incerteza não foi considerado.

A incerteza expandida do sistema de medição de umidade relativa (U_{sur}) foi calculada multiplicando-se a incerteza combinada pelo fator de abrangência $k=2$, o que fornece uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. Porém, 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 tais valores foram multiplicados por coeficientes de sensibilidade.

$$U_{sur} = \sqrt{\left(u_t \times \frac{\delta UR}{\delta T}\right)^2 + \left(u_{vc} \times \frac{\delta UR}{\delta T}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{rt}}{\sqrt{12}} \times \frac{\delta UR}{\delta T}\right)^2 + \left(u_h \times \frac{\delta UR}{\delta TPO}\right)^2 + \dots} \\ \sqrt{\dots + \left(\frac{\delta_{rh}}{\sqrt{12}} \times \frac{\delta UR}{\delta TPO}\right)^2 + \left(\delta_{ajuste} \times \frac{\delta UR}{\delta TPO}\right)^2} \quad (50)$$

$$U_{sur} = k \times U_{sur} \quad (51)$$

Onde,

$\frac{\delta UR}{\delta T}$ – Coeficiente de sensibilidade da variação de umidade relativa em

função da temperatura

$\frac{\delta UR}{\delta TPO}$ – Coeficiente de sensibilidade da variação de umidade relativa em

função da temperatura de ponto de orvalho

Os coeficientes de sensibilidade descrevem como a estimativa de saída y varia com alterações nos valores das estimativas de entradas x_1, x_2, \dots, x_n (ABNT & INMETRO, 2003). Neste caso, os coeficientes de sensibilidade descrevem como a

umidade relativa varia com alterações nos valores de temperatura e de temperatura de ponto de orvalho.

Os coeficientes de sensibilidade da variação de umidade relativa em função da temperatura e da temperatura de ponto de orvalho foram determinados para cada local de medição através da temperatura de ponto de orvalho média, medida no centro do espaço de trabalho, e da temperatura média de referência do local de medição. Os cálculos foram executados através de um *software* desenvolvido e validado pelo LAHIG.

As tabelas 26 e 27, a seguir, apresentam os coeficientes de sensibilidade de temperatura $\left(\frac{\delta UR}{\delta T}\right)$ e de temperatura de ponto de orvalho $\left(\frac{\delta UR}{\delta TPO}\right)$ para todos os locais de medição do espaço de trabalho.

Tabela 26 – Coeficientes de sensibilidade de temperatura

Nº	30 %ur	45 %ur	60 %ur	75 %ur	90 %ur
01	1,69	2,67	3,64	4,61	5,56
02	1,69	2,65	3,60	4,56	5,49
03	1,71	2,68	3,63	4,59	5,53
04	1,68	2,66	3,62	4,59	5,54
05	1,69	2,67	3,64	4,60	5,55
06	1,69	2,68	3,66	4,64	5,59
07	1,71	2,68	3,64	4,60	5,54
08	1,73	2,69	3,65	4,61	5,54
09	1,70	2,68	3,65	4,62	5,57

Fonte: Elaboração própria

Tabela 27 – Coeficientes de sensibilidade de temperatura de ponto de orvalho

Nº	30 %ur	45 %ur	60 %ur	75 %ur	90 %ur
01	1,97	2,96	3,88	4,78	5,63
02	1,97	2,94	3,85	4,73	5,57
03	2,00	2,96	3,87	4,76	5,60
04	1,96	2,94	3,87	4,76	5,61
05	1,98	2,96	3,88	4,77	5,62
06	1,97	2,96	3,90	4,80	5,66
07	2,00	2,97	3,88	4,77	5,61
08	2,01	2,98	3,89	4,78	5,62
09	1,98	2,96	3,89	4,79	5,64

Fonte: Elaboração própria

As incertezas expandidas e combinadas dos termômetros foram mostradas na tabela 12. No caso do higrômetro, a incerteza combinada (u_h) foi obtida dividindo-se a incerteza expandida (U_h) pelo fator de abrangência (k) declarado no certificado de calibração. A tabela 28, a seguir, apresenta as incertezas expandida e combinada do higrômetro e o fator de abrangência.

Tabela 28 – Incertezas do higrômetro

U_h (°C)	K	u_h (°C)
0,06	2,0	0,03

Fonte: Elaboração própria

As incertezas combinada (u_{sur}) e expandida (U_{sur}) do sistema de medição umidade relativa de cada local de medição foram calculadas segundo as equações 50 e 51, onde as incertezas dos termômetros foram apresentadas na tabela 12; as incertezas propagadas devido à variação da calibração dos sensores de temperatura (u_{vc}), quando da segunda verificação, foram apresentadas na tabela 7; as incertezas do higrômetro na tabela 28; os coeficientes de sensibilidade de temperatura na tabela 26 e os coeficientes de sensibilidade de temperatura de ponto de orvalho na tabela 27. A tabela 29, a seguir, apresenta as incertezas combinada e expandida do sistema de medição de umidade relativa de cada local.

Tabela 29 – Incertezas combinadas e expandidas dos sistemas de medição (%ur)

		01	02	03	04	05	06	07	08	09
30 %ur	u_{sur}	0,086	0,077	0,080	0,081	0,079	0,084	0,084	0,085	0,080
	U_{sur}	0,171	0,154	0,161	0,161	0,159	0,168	0,168	0,170	0,160
45 %ur	u_{sur}	0,130	0,115	0,120	0,122	0,120	0,128	0,126	0,128	0,121
	U_{sur}	0,261	0,231	0,240	0,245	0,240	0,256	0,252	0,256	0,242
60 %ur	u_{sur}	0,173	0,152	0,158	0,162	0,158	0,170	0,166	0,169	0,160
	U_{sur}	0,346	0,304	0,316	0,324	0,316	0,340	0,333	0,337	0,320
75 %ur	u_{sur}	0,215	0,187	0,196	0,201	0,195	0,211	0,206	0,209	0,198
	U_{sur}	0,430	0,375	0,391	0,402	0,391	0,423	0,412	0,418	0,396
90 %ur	u_{sur}	0,255	0,221	0,231	0,238	0,231	0,251	0,244	0,247	0,234
	U_{sur}	0,511	0,442	0,462	0,476	0,463	0,502	0,488	0,494	0,468

Fonte: Elaboração própria

Os desvios padrões experimentais de umidade relativa (s_{ur}) foram calculados, através da equação 10, e os valores estão apresentados na tabela 30, a seguir.

Tabela 30 – Desvios padrões de umidade Relativa (%ur)

Nº	30 %ur	45 %ur	60 %ur	75 %ur	90 %ur
01	0,3166	0,2165	0,4224	0,8244	0,4725
02	0,3134	0,2078	0,4199	0,8194	0,4282
03	0,3187	0,2128	0,4184	0,8286	0,4398
04	0,3120	0,2111	0,4245	0,8191	0,4410
05	0,3155	0,2128	0,4241	0,8234	0,4524
06	0,3170	0,2209	0,4224	0,8271	0,4954
07	0,3182	0,2114	0,4232	0,8307	0,4363
08	0,3211	0,2145	0,4187	0,8351	0,4471
09	0,3161	0,2151	0,4245	0,8260	0,4622

Fonte: Elaboração própria

As incertezas expandidas associadas aos valores médios de umidade relativa de referência dos locais de medição (U_{URI}) foram calculadas através da equação 12, utilizando-se fator de abrangência $k=2$, o que fornece uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. Os resultados estão apresentados na tabela 31, a seguir.

Tabela 31 – Incertezas expandidas dos valores médios de umidade relativa de referência dos locais de medição (%ur)

Nº	30 %ur	45 %ur	60 %ur	75 %ur	90 %ur
01	0,66	0,51	0,91	1,70	1,07
02	0,65	0,48	0,89	1,68	0,96
03	0,66	0,49	0,89	1,70	0,99
04	0,64	0,49	0,91	1,69	1,00
05	0,65	0,49	0,91	1,69	1,02
06	0,66	0,51	0,91	1,71	1,11
07	0,66	0,49	0,91	1,71	1,00
08	0,66	0,50	0,90	1,72	1,02
09	0,65	0,49	0,91	1,70	1,04

Fonte: Elaboração própria

A tabela 32, a seguir, apresenta, para cada ponto, a umidade relativa média de referência local máxima ($UR_{i \max}$), a umidade relativa média de referência local mínima ($UR_{i \min}$), a incerteza expandida associada à umidade relativa média de referência local máxima ($U_{URI \max}$), a incerteza expandida associada à umidade relativa média de referência local mínima ($U_{URI \min}$) e o gradiente de umidade relativa (HUR).

Tabela 32 – Gradientes de umidade relativa (%ur)

	30 %ur	45 %ur	60 %ur	75 %ur	90 %ur
UR _I max	27,95	43,61	59,20	75,00	90,50
UR _I min	27,32	43,06	58,44	73,87	88,98
U _{URI} max	0,66	0,50	0,91	1,71	1,11
U _{URI} min	0,64	0,48	0,89	1,68	0,96
HUR (%ur)	1,93	1,53	2,56	4,52	3,59

Fonte: Elaboração própria

As incertezas combinadas dos sistemas de medição de umidade relativa foram calculadas, conforme a equação 50, para os valores máximos e mínimos de umidade relativa.

Os coeficientes de sensibilidade da variação de umidade relativa em função da temperatura e da temperatura de ponto de orvalho foram calculados através de um *software* desenvolvido e validado pelo LAHIG.

As incertezas expandidas dos sistemas de medição de umidade relativa foram calculadas, conforme a equação 51, para os valores máximos e mínimos de umidade relativa, utilizando-se fator de abrangência $k=2$, o que fornece uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

A tabela 33, a seguir, apresenta, para cada ponto, as incertezas combinadas dos termômetros referentes aos valores máximo e mínimo de umidade relativa (u_t), as incertezas combinadas do higrômetro referentes aos valores máximo e mínimo de umidade relativa (u_h), os coeficientes de sensibilidade de temperatura referentes aos valores máximo e mínimo de umidade relativa $\left(\frac{\delta UR}{\delta T}\right)$, os coeficientes de sensibilidade de temperatura de ponto de orvalho referentes aos valores máximo e mínimo de umidade relativa $\left(\frac{\delta UR}{\delta TPO}\right)$, as resoluções do indicador digital (δ_{it}) e do higrômetro (δ_{rh}), as incertezas propagadas devido à variação da calibração dos sensores de temperatura (u_{vc}), as incertezas do ajuste da curva de correção do higrômetro (δ_{ajuste}) e as incertezas expandidas dos sistemas de medição que indicaram os valores máximo ($U_{sur\ max}$) e mínimo de umidade relativa ($U_{sur\ min}$).

Tabela 33 – Incertezas expandidas dos sistemas de medição de umidade relativa dos valores máximo e mínimo de umidade relativa

	30 %ur	45 %ur	60 %ur	75 %ur	90 %ur
u_t (°C)	0,049	0,049	0,050	0,050	0,050
δ_{rt} (°C)	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
u_{vc} (°C)	0,0013	0,0013	0,0024	0,0024	0,0024
$\frac{\delta UR}{\delta T}$ (%ur/°C)	1,77	2,72	3,70	4,73	5,64
u_h (°C)	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
δ_{rh} (°C)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
δ_{ajuste} (°C)	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
$\frac{\delta UR}{\delta TPO}$ (%ur/°C)	2,05	3,00	3,94	4,89	5,71
$U_{sur\ max}$ (%ur)	0,17	0,26	0,34	0,43	0,51
u_t (°C)	0,043	0,030	0,030	0,030	0,030
δ_{rt} (°C)	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
u_{vc} (°C)	0,0018	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031
$\frac{\delta UR}{\delta T}$ (%ur/°C)	1,65	2,63	3,56	4,44	5,42
u_h (°C)	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
δ_{rh} (°C)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
δ_{ajuste} (°C)	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
$\frac{\delta UR}{\delta TPO}$ (%ur/°C)	1,93	2,91	3,81	4,62	5,50
$U_{sur\ min}$ (%ur)	0,16	0,23	0,30	0,37	0,44

Fonte: Elaboração própria

A tabela 34, a seguir, apresenta, para cada ponto, a umidade relativa máxima (ur_{max}), a umidade relativa mínima (ur_{min}), a incerteza expandida do sistema de medição de umidade relativa que indicou o valor máximo ($U_{sur\ max}$), a incerteza expandida do sistema de medição de umidade relativa que indicou o valor mínimo ($U_{sur\ min}$) e o gradiente máximo de umidade relativa (HUR_M).

Tabela 34 – Gradientes máximos de umidade relativa (%ur)

	30 %ur	45 %ur	60 %ur	75 %ur	90 %ur
ur_{max}	28,62	43,99	59,97	76,56	91,28
ur_{min}	26,74	42,58	57,70	71,91	87,81
$U_{sur\ max}$	0,17	0,26	0,34	0,43	0,51
$U_{sur\ min}$	0,16	0,23	0,30	0,37	0,44
HUR_M	2,21	1,90	2,91	5,45	4,42

Fonte: Elaboração própria

3.6.4.2 Conforme o guia do DKD

As variações de umidade relativa no espaço, conforme o guia DKD-R 5-7 (DKD, 2004), foram obtidas através do cálculo dos valores de não homogeneidade espacial, que consiste na maior diferença de umidade relativa entre um local de medição e o local de referência, que neste caso é o centro do espaço de trabalho.

A tabela 35, a seguir, mostra os valores de não homogeneidade espacial (δUR_{inhom}).

Tabela 35 – Não homogeneidade espacial de umidade relativa

	30 %ur	45 %ur	60 %ur	75 %ur	90 %ur
δUR_{inhom} (%ur)	0,45	0,34	0,50	0,73	0,93

Fonte: Elaboração própria

3.6.4.3 Conforme o guia do SEE

As variações de umidade relativa, conforme o guia *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003), 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. A tabela 36, a seguir, apresenta os valores dos gradientes.

Tabela 36 – Gradientes de umidade relativa

30 %ur	45 %ur	60 %ur	75 %ur	90 %ur
0,23	0,18	0,24	0,36	0,46

Fonte: Elaboração própria

3.6.5 Variações de temperatura ao longo do tempo

3.6.5.1 Conforme a norma da AFNOR

Segundo a norma NF X15-140 (AFNOR, 2002), a variação de temperatura ao longo do tempo, denominada flutuação, é calculada em cada local de medição do

espaço de trabalho através da diferença entre as temperaturas máxima e mínima do termômetro. O maior valor é adotado como flutuação máxima de temperatura.

A tabela 37, a seguir, apresenta as temperaturas máximas dos locais de medição do espaço de trabalho ($t_{\max I}$), as temperaturas mínimas dos locais de medição do espaço de trabalho ($t_{\min I}$), as flutuações de temperatura (FT) e as flutuações máximas de temperatura (FT_M).

Tabela 37 – Flutuações de temperatura (°C)

		Locais de Medição do Espaço de Trabalho								
		01	02	03	04	05	06	07	08	09
0 °C	$t_{\max I}$	0,331	0,612	0,495	0,470	0,396	0,276	0,454	0,457	0,343
	$t_{\min I}$	-0,034	0,414	0,249	0,267	0,151	-0,176	0,235	0,191	0,076
	FT	0,365	0,198	0,246	0,203	0,245	0,452	0,218	0,266	0,266
	FT_M	0,452								
5 °C	$t_{\max I}$	5,507	5,666	5,504	5,637	5,522	5,475	5,470	5,409	5,472
	$t_{\min I}$	5,381	5,582	5,384	5,545	5,416	5,330	5,369	5,273	5,361
	FT	0,126	0,084	0,120	0,092	0,106	0,145	0,100	0,136	0,111
	FT_M	0,145								
10 °C	$t_{\max I}$	10,484	10,639	10,507	10,579	10,505	10,447	10,475	10,419	10,463
	$t_{\min I}$	10,401	10,571	10,415	10,523	10,433	10,347	10,396	10,314	10,387
	FT	0,083	0,068	0,091	0,057	0,072	0,100	0,078	0,106	0,076
	FT_M	0,106								
15 °C	$t_{\max I}$	15,563	15,715	15,602	15,636	15,587	15,511	15,570	15,525	15,550
	$t_{\min I}$	15,392	15,551	15,435	15,477	15,423	15,329	15,404	15,354	15,383
	FT	0,172	0,164	0,167	0,160	0,165	0,182	0,166	0,171	0,167
	FT_M	0,182								
20 °C	$t_{\max I}$	20,545	20,673	20,590	20,590	20,567	20,493	20,553	20,528	20,532
	$t_{\min I}$	20,448	20,587	20,498	20,504	20,477	20,384	20,462	20,429	20,437
	FT	0,096	0,086	0,091	0,085	0,090	0,109	0,091	0,099	0,095
	FT_M	0,109								
25 °C	$t_{\max I}$	25,554	25,650	25,591	25,569	25,560	25,509	25,554	25,538	25,532
	$t_{\min I}$	25,474	25,579	25,509	25,505	25,491	25,415	25,479	25,444	25,462
	FT	0,080	0,071	0,082	0,064	0,069	0,094	0,075	0,094	0,070
	FT_M	0,094								
30 °C	$t_{\max I}$	30,645	30,730	30,689	30,654	30,677	30,633	30,665	30,641	30,658
	$t_{\min I}$	30,525	30,615	30,582	30,543	30,555	30,493	30,547	30,520	30,536
	FT	0,120	0,115	0,107	0,111	0,122	0,140	0,118	0,121	0,121
	FT_M	0,140								

		Locais de Medição do Espaço de Trabalho								
		01	02	03	04	05	06	07	08	09
35 °C	t _{max I}	35,655	35,688	35,686	35,625	35,658	35,657	35,644	35,637	35,653
	t _{min I}	35,540	35,595	35,578	35,535	35,558	35,528	35,542	35,517	35,547
	FT	0,115	0,093	0,107	0,089	0,100	0,129	0,101	0,120	0,106
	FT _M	0,129								
40 °C	t _{max I}	40,704	40,700	40,724	40,655	40,702	40,714	40,686	40,684	40,707
	t _{min I}	40,606	40,624	40,626	40,581	40,618	40,605	40,595	40,566	40,618
	FT	0,099	0,076	0,098	0,074	0,084	0,109	0,091	0,118	0,089
	FT _M	0,118								
45 °C	t _{max I}	45,695	45,697	45,752	45,630	45,709	45,698	45,719	45,748	45,739
	t _{min I}	45,619	45,633	45,666	45,571	45,637	45,618	45,639	45,632	45,654
	FT	0,076	0,065	0,085	0,059	0,072	0,079	0,081	0,116	0,085
	FT _M	0,116								
50 °C	t _{max I}	50,669	50,702	50,806	50,600	50,720	50,649	50,783	50,850	50,779
	t _{min I}	50,573	50,624	50,696	50,520	50,625	50,548	50,677	50,712	50,670
	FT	0,096	0,078	0,110	0,079	0,095	0,101	0,106	0,138	0,110
	FT _M	0,138								
55 °C	t _{max I}	55,670	55,725	55,871	55,581	55,748	55,632	55,862	55,962	55,842
	t _{min I}	55,456	55,544	55,658	55,397	55,541	55,404	55,647	55,726	55,620
	FT	0,215	0,181	0,213	0,184	0,208	0,228	0,215	0,236	0,222
	FT _M	0,236								
60 °C	t _{max I}	60,625	60,703	60,901	60,541	60,737	60,563	60,900	61,049	60,870
	t _{min I}	60,428	60,542	60,701	60,369	60,547	60,357	60,699	60,815	60,659
	FT	0,197	0,160	0,200	0,172	0,190	0,207	0,201	0,234	0,211
	FT _M	0,234								
65 °C	t _{max I}	65,551	65,674	65,907	65,465	65,700	65,465	65,919	66,105	65,869
	t _{min I}	65,403	65,547	65,764	65,339	65,561	65,310	65,772	65,936	65,719
	FT	0,148	0,127	0,143	0,126	0,139	0,155	0,147	0,170	0,150
	FT _M	0,170								
70 °C	t _{max I}	70,517	70,667	70,959	70,420	70,707	70,414	70,981	71,217	70,919
	t _{min I}	70,368	70,539	70,806	70,297	70,564	70,256	70,827	71,034	70,765
	FT	0,149	0,128	0,152	0,123	0,143	0,158	0,154	0,183	0,154
	FT _M	0,183								

Fonte: Elaboração própria

3.6.5.2 Conforme o guia do DKD

Segundo o guia DKD-R 5-7 (DKD, 2004), a variação de temperatura ao longo do tempo, denominada instabilidade temporal, determinada pelo menos para o local de medição de referência, é a maior diferença entre uma medição do intervalo de medições e o valor médio.

A tabela 38, a seguir, apresenta os valores de instabilidade temporal de temperatura (δT_{instab}) para todos os locais de medição.

Tabela 38 – Instabilidade temporal de temperatura (°C)

	Locais de Medição do Espaço de Trabalho								
	01	02	03	04	05	06	07	08	09
0 °C	0,237	0,116	0,149	0,123	0,149	0,280	0,128	0,152	0,151
5 °C	0,065	0,044	0,062	0,048	0,056	0,075	0,053	0,070	0,059
10 °C	0,042	0,035	0,048	0,030	0,038	0,051	0,042	0,053	0,039
15 °C	0,089	0,085	0,086	0,083	0,085	0,093	0,085	0,090	0,087
20 °C	0,059	0,054	0,055	0,053	0,057	0,064	0,055	0,059	0,057
25 °C	0,041	0,036	0,042	0,034	0,035	0,049	0,041	0,048	0,036
30 °C	0,067	0,074	0,063	0,072	0,079	0,075	0,077	0,073	0,075
35 °C	0,062	0,057	0,063	0,054	0,058	0,065	0,061	0,070	0,061
40 °C	0,050	0,042	0,053	0,038	0,042	0,055	0,047	0,065	0,045
45 °C	0,043	0,037	0,046	0,033	0,040	0,044	0,045	0,063	0,048
50 °C	0,061	0,048	0,064	0,050	0,058	0,065	0,062	0,080	0,065
55 °C	0,127	0,106	0,126	0,113	0,123	0,135	0,125	0,138	0,130
60 °C	0,100	0,082	0,101	0,093	0,097	0,103	0,101	0,118	0,107
65 °C	0,079	0,072	0,077	0,069	0,074	0,080	0,079	0,091	0,082
70 °C	0,076	0,064	0,080	0,066	0,073	0,080	0,081	0,100	0,082

Fonte: Elaboração própria

3.6.5.3 Conforme o guia do SEE

Segundo o guia *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003), a variação de temperatura ao longo do tempo, denominada flutuação, é obtida calculando-se para cada termômetro o desvio padrão experimental das leituras. O maior valor encontrado é adotado como flutuação. As tabelas 39 e 40, a seguir, apresentam os valores de flutuação.

Tabela 39 – Flutuações de temperatura (°C): 0 °C a 30 °C

0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
0,085	0,032	0,027	0,049	0,026	0,027	0,030

Fonte: Elaboração própria

Tabela 40 – Flutuações de temperatura (°C): 35 °C a 70 °C

35 °C	40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C	65 °C	70 °C
0,029	0,027	0,026	0,030	0,058	0,058	0,043	0,044

Fonte: Elaboração própria

3.6.6 Variações de umidade relativa ao longo do tempo

3.6.6.1 Conforme a norma da AFNOR

Segundo a norma NF X15-140 (AFNOR, 2002), a variação de umidade relativa ao longo do tempo, denominada flutuação, é calculada em cada local de medição do espaço de trabalho através da diferença entre os valores máximo e mínimo. O maior valor é adotado como flutuação máxima de umidade relativa.

A tabela 41, a seguir, apresenta os valores máximos ($ur_{max\ i}$) e mínimos ($ur_{min\ i}$) de umidade relativa dos locais de medição do espaço de trabalho, as flutuações de umidade relativa (FUR) e as flutuações máximas de umidade relativa (FUR_M).

Tabela 41 – Flutuações de umidade relativa (%ur)

		Locais de Medição do Espaço de Trabalho								
		01	02	03	04	05	06	07	08	09
30 %ur	$ur_{max\ i}$	28,11	28,12	28,43	27,96	28,18	28,05	28,44	28,62	28,19
	$ur_{min\ i}$	26,85	26,89	27,17	26,74	26,94	26,79	27,20	27,34	26,94
	FUR	1,26	1,23	1,26	1,22	1,24	1,26	1,24	1,28	1,25
	FUR_M	1,28								
45 %ur	$ur_{max\ i}$	43,69	43,41	43,76	43,47	43,67	43,77	43,84	43,99	43,72
	$ur_{min\ i}$	42,83	42,58	42,90	42,63	42,81	42,89	42,98	43,11	42,86
	FUR	0,86	0,83	0,86	0,84	0,86	0,88	0,86	0,88	0,86
	FUR_M	0,88								
60 %ur	$ur_{max\ i}$	59,77	59,22	59,61	59,52	59,69	59,97	59,72	59,82	59,82
	$ur_{min\ i}$	58,23	57,70	58,09	57,99	58,16	58,44	58,19	58,28	58,29
	FUR	1,54	1,52	1,52	1,53	1,53	1,53	1,53	1,54	1,53
	FUR_M	1,54								
75 %ur	$ur_{max\ i}$	76,16	75,41	75,94	75,89	76,07	76,56	76,05	76,17	76,26
	$ur_{min\ i}$	72,70	71,91	72,38	72,41	72,58	73,04	72,49	72,60	72,78
	FUR	3,46	3,50	3,56	3,48	3,49	3,52	3,56	3,57	3,48
	FUR_M	3,57								
90 %ur	$ur_{max\ i}$	90,80	89,71	90,28	90,43	90,63	91,28	90,40	90,51	90,90
	$ur_{min\ i}$	88,66	87,81	88,33	88,46	88,61	89,07	88,45	88,52	88,83
	FUR	2,14	1,90	1,95	1,97	2,02	2,21	1,95	1,99	2,07
	FUR_M	2,21								

Fonte: Elaboração própria

3.6.6.2 Conforme o guia do DKD

Segundo o guia DKD-R 5-7 (DKD, 2004), a variação de umidade relativa ao longo do tempo, denominada instabilidade temporal, determinada pelo menos para o local de medição de referência, é a maior diferença entre uma medição do intervalo de medições e o valor médio.

A tabela 42, a seguir, apresenta os valores de instabilidade temporal de umidade relativa (δUR_{instab}) para todos os locais de medição.

Tabela 42 – Instabilidade temporal de umidade relativa (%ur)

	Locais de Medição do Espaço de Trabalho								
	01	02	03	04	05	06	07	08	09
30 %ur	0,66	0,64	0,66	0,64	0,65	0,68	0,65	0,67	0,66
45 %ur	0,50	0,48	0,50	0,49	0,49	0,49	0,50	0,50	0,50
60 %ur	0,78	0,77	0,77	0,78	0,78	0,77	0,78	0,77	0,77
75 %ur	1,96	1,96	1,98	1,96	1,97	1,96	1,98	2,00	1,97
90 %ur	1,37	1,18	1,21	1,22	1,26	1,42	1,22	1,25	1,31

Fonte: Elaboração própria

3.6.6.3 Conforme o guia do SEE

Segundo o guia *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003), a variação de umidade relativa ao longo do tempo, denominada flutuação, é obtida calculando-se para cada local do espaço de trabalho o desvio padrão experimental das leituras. O maior valor é adotado como flutuação. A tabela 43, a seguir, apresenta os valores de flutuação de umidade relativa.

Tabela 43 – Flutuações de umidade relativa (%ur)

30 %ur	45 %ur	60 %ur	75 %ur	90 %ur
0,32	0,22	0,42	0,84	0,50

Fonte: Elaboração própria

3.6.7 Incertezas expandidas de temperatura

3.6.7.1 Conforme a norma da AFNOR

A incerteza expandida da temperatura média de referência do espaço de trabalho, conforme a norma NF X15-140 (AFNOR, 2002), foi calculada através da equação 18, onde foi utilizado fator de abrangência $k=2$, que fornece uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

A tabela 44, a seguir, apresenta, para cada ponto, o desvio padrão da repetitividade de temperatura calculado através da equação 15 ($s_{rt \text{ calc}}$) e o desvio padrão da repetitividade de temperatura como sendo o maior desvio padrão obtido no espaço de trabalho ($s_{rt \text{ stmax}}$).

Tabela 44 – Desvio padrão da repetitividade de temperatura

	$s_{rt \text{ calc}}$ (°C)	$s_{rt \text{ stmax}}$ (°C)
0 °C	0,0547	0,0850
5 °C	0,0251	0,0323
10 °C	0,0205	0,0273
15 °C	0,0449	0,0489
20 °C	0,0232	0,0261
25 °C	0,0214	0,0268
30 °C	0,0274	0,0304
35 °C	0,0245	0,0289
40 °C	0,0218	0,0270
45 °C	0,0181	0,0258
50 °C	0,0237	0,0300
55 °C	0,0534	0,0578
60 °C	0,0514	0,0581
65 °C	0,0370	0,0433
70 °C	0,0349	0,0443

Fonte: Elaboração própria

O desvio padrão da reprodutibilidade de temperatura (s_{Rt}) foi calculado conforme a equação 16, onde foi adotado como desvio padrão da repetitividade de temperatura (s_{rt}) o maior valor entre o calculado e o desvio padrão máximo do espaço de trabalho, ambos apresentados na tabela 44.

A incerteza combinada do dispositivo de medição de temperatura (u_{ct}) consiste no maior valor de incerteza combinada de um determinado sistema de medição de temperatura (u_{st}). As incertezas combinadas e expandidas dos sistemas de medição foram apresentadas na tabela 13.

A tabela 45, a seguir, apresenta as temperaturas médias de referência do espaço de trabalho (T), os desvios padrões da repetitividade de temperatura (s_{rt}), os desvios padrões da reprodutibilidade de temperatura (s_{Rt}), as incertezas combinadas dos dispositivos de medição de temperatura (u_{ct}), as incertezas combinadas associadas às temperaturas médias de referência do espaço de trabalho (u_T) e as incertezas expandidas associadas às temperaturas médias de referência do espaço de trabalho (U_T).

Tabela 45 – Incertezas associadas às temperaturas médias de referência do espaço de trabalho

T (°C)	s_{rt} (°C)	s_{Rt} (°C)	u_{ct} (°C)	u_T (°C)	U_T (°C)
0,26	0,0850	0,1719	0,0296	0,1745	0,35
5,46	0,0323	0,0946	0,0296	0,0991	0,20
10,46	0,0273	0,0791	0,0296	0,0845	0,17
15,50	0,0489	0,0808	0,0296	0,0860	0,17
20,51	0,0261	0,0600	0,0296	0,0669	0,13
25,52	0,0268	0,0510	0,0296	0,0590	0,12
30,59	0,0304	0,0428	0,0296	0,0520	0,10
35,61	0,0289	0,0369	0,0296	0,0473	0,10
40,65	0,0270	0,0330	0,0296	0,0443	0,09
45,67	0,0258	0,0404	0,0296	0,0501	0,10
50,69	0,0300	0,0796	0,0296	0,0849	0,17
55,68	0,0578	0,1344	0,0296	0,1377	0,28
60,67	0,0581	0,1785	0,0296	0,1809	0,36
65,66	0,0433	0,2246	0,0296	0,2266	0,45
70,68	0,0443	0,2749	0,0296	0,2765	0,55

Fonte: Elaboração própria

A tabela 46, a seguir, apresenta a temperatura ajustada 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 equivale a diferença entre a temperatura média de referência do espaço de trabalho e a temperatura média da câmara climática; e a incerteza expandida associada à temperatura média de referência do espaço de trabalho (U_T).

Tabela 46 – Apresentação dos resultados em °C (AFNOR)

T_a	T_c	T	ΔT_{in}	U_T
0	0,24	0,26	0,02	0,35
5	5,13	5,46	0,33	0,20
10	10,07	10,46	0,39	0,17
15	15,14	15,50	0,36	0,17
20	20,08	20,51	0,43	0,13
25	25,08	25,52	0,44	0,12
30	30,04	30,59	0,55	0,10
35	35,04	35,61	0,57	0,10
40	39,98	40,65	0,67	0,09
45	45,03	45,67	0,64	0,10
50	49,97	50,69	0,72	0,17
55	54,91	55,68	0,77	0,28
60	59,92	60,67	0,75	0,36
65	64,87	65,66	0,79	0,45
70	69,91	70,68	0,77	0,55

Fonte: Elaboração própria

3.6.7.2 Conforme o guia do DKD

A incerteza expandida da calibração da indicação de temperatura da câmara em relação ao espaço de trabalho (U_{Tc}), conforme o guia DKD-R 5-7 (DKD, 2004), foi calculada utilizando-se das seguintes fontes: incerteza combinada do sistema de medição de temperatura (u_{st}), incerteza devido à resolução da indicação de temperatura da câmara [$u(\delta T_{res})$], incerteza devido à não homogeneidade espacial de temperatura [$u(\delta T_{inhom})$], incerteza devido à instabilidade temporal de temperatura [$u(\delta T_{instab})$], desvio padrão experimental da temperatura média do local de medição de referência [$u(\delta T)$] e desvio padrão experimental da temperatura média da câmara climática [$u(\delta T_c)$]. Foi utilizado fator de abrangência $k=2$, o que fornece uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A seguinte equação foi então utilizada para o cálculo da incerteza expandida:

$$U_{Tc} = k \times \sqrt{u_{st}^2 + u(\delta T_{res})^2 + u(\delta T_{inhom})^2 + u(\delta T_{instab})^2 + u(\delta T)^2 + u(\delta T_c)^2} \quad (52)$$

A incerteza combinada do sistema de medição de temperatura do local de medição de referência (centro do espaço de trabalho) foi apresentada na tabela 13.

A incerteza devido à resolução da indicação de temperatura da câmara [$u(\delta T_{\text{res}})$] foi estimada como sendo a metade do valor do dígito (0,1 °C) e equivale a meia largura de uma distribuição de probabilidade retangular. Assim:

$$u(\delta T_{\text{res}}) = \frac{0,1}{2 \times \sqrt{3}} = 0,0289 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (53)$$

Os valores de não homogeneidade espacial de temperatura (δT_{inhom}) foram apresentados nas tabelas 22 e 23. As incertezas referentes a estes valores foram calculadas através da equação 5.

Os valores de instabilidade temporal de temperatura para todos os locais de medição (δT_{instab}) foram apresentados na tabela 38. A incerteza referente à instabilidade temporal de temperatura do local de medição de referência (centro do espaço de trabalho) foi calculada, para cada ponto, através da equação 7.

O desvio padrão experimental da temperatura média do local de medição de referência [$u(\delta T)$] 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 temperatura média da câmara climática [$u(\delta T_C)$] 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 tabela 47, a seguir, apresenta, para cada temperatura de ajuste (T_a), a incerteza combinada do sistema de medição de temperatura do local de referência (u_{st}), a incerteza devido à resolução da indicação de temperatura da câmara [$u(\delta T_{\text{res}})$], a incerteza devido à não homogeneidade espacial de temperatura [$u(\delta T_{\text{inhom}})$], a incerteza devido à instabilidade temporal de temperatura do local de medição de referência [$u(\delta T_{\text{instab}})$], o desvio padrão experimental da temperatura média do local de medição de referência [$u(\delta T)$], o desvio padrão experimental da temperatura média da câmara climática [$u(\delta T_C)$], a incerteza combinada da calibração da indicação de temperatura da câmara em relação ao espaço de trabalho (u_{T_C}) e a incerteza expandida da calibração da indicação de temperatura da câmara em relação ao espaço de trabalho (U_{T_C}), calculada conforme a equação 52.

Tabela 47 – Incertezas combinadas e expandidas de temperatura (°C)

T_a	u_{st}	$u(\delta T_{res})$	$u(\delta T_{inhom})$	$u(\delta T_{instab})$	$u(\delta T)$	$u(\delta T_c)$	u_{Tc}	U_{Tc}
0	0,019	0,0289	0,1981	0,0862	0,0049	0,0094	0,219	0,44
5	0,019	0,0289	0,0991	0,0321	0,0024	0,0047	0,110	0,22
10	0,019	0,0289	0,0873	0,0217	0,0019	0,0045	0,096	0,19
15	0,019	0,0289	0,0830	0,0490	0,0047	0,0058	0,103	0,21
20	0,019	0,0289	0,0699	0,0326	0,0023	0,0000	0,085	0,17
25	0,019	0,0289	0,0569	0,0200	0,0020	0,0049	0,070	0,14
30	0,019	0,0289	0,0428	0,0453	0,0029	0,0039	0,071	0,14
35	0,019	0,0289	0,0291	0,0337	0,0024	0,0052	0,057	0,11
40	0,019	0,0289	0,0323	0,0244	0,0020	0,0052	0,053	0,11
45	0,019	0,0289	0,0479	0,0231	0,0017	0,0051	0,064	0,13
50	0,019	0,0289	0,0813	0,0334	0,0023	0,0052	0,095	0,19
55	0,019	0,0289	0,1396	0,0712	0,0055	0,0089	0,161	0,32
60	0,019	0,0289	0,1879	0,0557	0,0052	0,0058	0,199	0,40
65	0,019	0,0289	0,2364	0,0430	0,0038	0,0050	0,243	0,49
70	0,019	0,0289	0,3026	0,0421	0,0034	0,0050	0,308	0,62

Fonte: Elaboração própria

A tabela 48, a seguir, apresenta para cada temperatura de ajuste na câmara (T_a), a temperatura média da câmara (T_c); a temperatura média do local de medição de referência ($T_{I_{ref}}$), que corresponde ao centro de espaço de trabalho; a correção da indicação de temperatura (ΔT_{in}), que equivale a diferença entre a temperatura média do local de medição de referência e a temperatura média da câmara climática; e a incerteza expandida da calibração da indicação de temperatura da câmara em relação ao espaço de trabalho (U_{Tc}).

Tabela 48 – Apresentação dos resultados em °C (DKD)

T_a	T_c	$T_{I_{ref}}$	ΔT_{in}	U_{Tc}
0	0,24	0,25	0,01	0,44
5	5,13	5,47	0,34	0,22
10	10,07	10,47	0,40	0,19
15	15,14	15,50	0,36	0,21
20	20,08	20,51	0,43	0,17
25	25,08	25,53	0,45	0,14
30	30,04	30,60	0,56	0,14
35	35,04	35,62	0,58	0,11
40	39,98	40,66	0,68	0,11
45	45,03	45,67	0,64	0,13

T_a	T_c	$T_{I\text{ ref}}$	ΔT_{in}	U_{Tc}
50	49,97	50,68	0,71	0,19
55	54,91	55,66	0,75	0,32
60	59,92	60,64	0,72	0,40
65	64,87	65,63	0,76	0,49
70	69,91	70,63	0,72	0,62

Fonte: Elaboração própria

3.6.7.3 Conforme o guia do SEE

A incerteza expandida da calibração da câmara climática, pelo método de análise do caso médio do guia *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003), foi calculada através da multiplicação da incerteza padrão combinada, determinada através da raiz quadrada da soma das incertezas ao quadrado, pelo fator de abrangência $k=2$, que fornece uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A seguinte equação foi então utilizada para o cálculo da incerteza expandida:

$$U_T = k \times \sqrt{u_{st}^2 + \delta_{Gt}^2 + \delta_{Ft}^2 + u(\delta T)^2 + u(\delta T_c)^2 + u(\delta T_{res})^2} \quad (54)$$

Onde,

u_{st} – Incerteza combinada do sistema de medição de temperatura

δ_{Gt} – Incerteza referente ao gradiente de temperatura

δ_{Ft} – Incerteza referente à flutuação de temperatura

$u(\delta T)$ – Desvio padrão experimental da temperatura média de referência do espaço de trabalho

$u(\delta T_c)$ – Desvio padrão experimental da temperatura média da câmara

$u(\delta T_{res})$ – Incerteza devido à resolução da indicação de temperatura da câmara

A incerteza referente ao sistema de medição de temperatura foi determinada para cada local de medição e o maior valor obtido foi adotado. As incertezas combinadas dos sistemas de medição foram apresentadas na tabela 13.

Os gradientes de temperatura, apresentados nas tabelas 24 e 25, e as flutuações, apresentadas nas tabelas 39 e 40, baseiam-se numa distribuição normal pois são provenientes de um conjunto de medições.

Já o desvio padrão experimental da temperatura média de referência do espaço de trabalho 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 temperatura média da câmara climática 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 foi estimada como sendo a metade do valor do dígito e equivale a meia largura de uma distribuição de probabilidade retangular, conforme a equação 53.

A tabela 49, a seguir, apresenta para cada ponto analisado a temperatura média de referência do espaço de trabalho (T), a incerteza referente ao sistema de medição de temperatura (u_{st}), a incerteza referente ao gradiente de temperatura (δ_{Gt}), a incerteza referente à flutuação de temperatura (δ_{Ft}), o desvio padrão experimental da temperatura média de referência do espaço de trabalho [$u(\delta T)$], o desvio padrão experimental da temperatura média da câmara climática [$u(\delta T_C)$], a incerteza devido à resolução da indicação de temperatura da câmara [$u(\delta T_{res})$], a incerteza combinada da calibração da câmara (u_T) e a incerteza expandida da calibração da câmara (U_T), calculada conforme a equação 54.

Tabela 49 – Incertezas combinadas e expandidas de temperatura ($^{\circ}C$)

T	u_{st}	δ_{Gt}	δ_{Ft}	$u(\delta T)$	$u(\delta T_C)$	$u(\delta T_{res})$	u_T	U_T
0,26	0,030	0,189	0,085	0,005	0,0094	0,0289	0,212	0,42
5,46	0,030	0,100	0,032	0,003	0,0047	0,0289	0,113	0,23
10,46	0,030	0,084	0,027	0,003	0,0045	0,0289	0,098	0,20
15,50	0,030	0,077	0,049	0,003	0,0058	0,0289	0,100	0,20
20,51	0,030	0,064	0,026	0,002	0,0000	0,0289	0,081	0,16
25,52	0,030	0,052	0,027	0,002	0,0049	0,0289	0,072	0,14
30,59	0,030	0,040	0,030	0,001	0,0039	0,0289	0,065	0,13
35,61	0,030	0,029	0,029	0,001	0,0052	0,0289	0,058	0,12
40,65	0,030	0,024	0,027	0,001	0,0052	0,0289	0,055	0,11
45,67	0,030	0,040	0,026	0,001	0,0051	0,0289	0,063	0,13
50,69	0,030	0,085	0,030	0,003	0,0052	0,0289	0,099	0,20

T	u_{st}	δ_{Gt}	δ_{Ft}	u(δT)	u(δT_C)	u(δT_{res})	u_T	U_T
55,68	0,030	0,134	0,058	0,004	0,0089	0,0289	0,152	0,30
60,67	0,030	0,178	0,058	0,006	0,0058	0,0289	0,192	0,38
65,66	0,030	0,228	0,043	0,007	0,0050	0,0289	0,236	0,47
70,68	0,030	0,283	0,044	0,009	0,0050	0,0289	0,289	0,58

Fonte: Elaboração própria

A tabela 50, 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 equivale a diferença dentre 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 50 – Apresentação dos resultados em °C (SEE)

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

Fonte: Elaboração própria

Para o cálculo da incerteza expandida do valor de temperatura ajustado na câmara (U_{T_a}), pelo método da análise de pior caso, determinou-se a diferença entre a temperatura média de referência de cada local de medição do espaço de trabalho e a temperatura de ajuste. Foi adicionada a maior diferença encontrada (ΔT_{max}), o

dobro do seu valor de flutuação (δ_{Ft}) e a incerteza expandida do respectivo sistema de medição de temperatura (U_{st}). A seguinte equação foi então utilizada:

$$U_{Ta} = \Delta T_{\max} + 2 \times \delta_{Ft} + U_{st} \quad (55)$$

A tabela 51, a seguir, apresenta para cada temperatura ajustada na câmara (T_a), a maior diferença entre a temperatura média de referência de um local de medição e a temperatura de ajuste (ΔT_{\max}), a incerteza referente à flutuação (δ_{Ft}), a incerteza expandida do sistema de medição de temperatura (U_{st}) e a incerteza expandida da temperatura ajustada (U_{Ta}).

Tabela 51– Incertezas associadas às temperaturas ajustadas na câmara (°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

Fonte: Elaboração própria

3.6.8 Incertezas expandidas de umidade relativa

3.6.8.1 Conforme a norma da AFNOR

A incerteza expandida da umidade relativa média de referência do espaço de trabalho, conforme a norma NF X15-140 (AFNOR, 2002), foi calculada através da

equação 18, onde foi utilizado fator de abrangência $k=2$, que fornece uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

A tabela 52, a seguir, apresenta, para cada ponto, o desvio padrão da repetitividade de umidade relativa calculado através da equação 15 ($s_{rur\ calc}$) e o desvio padrão da repetitividade de umidade relativa como sendo o maior desvio padrão obtido no espaço de trabalho ($s_{rur\ surmax}$).

Tabela 52 – Desvio padrão da repetitividade de umidade relativa

	$s_{rur\ calc}$ (%ur)	$s_{rur\ surmax}$ (%ur)
30 %ur	0,3165	0,3211
45 %ur	0,2137	0,2209
60 %ur	0,4220	0,4245
75 %ur	0,8260	0,8351
90 %ur	0,4532	0,4954

Fonte: Elaboração própria

O desvio padrão da reprodutibilidade de umidade relativa (s_{Rur}) foi calculado conforme a equação 16, onde foi adotado como desvio padrão da repetitividade de umidade relativa (s_{rur}) o maior valor entre o calculado e o desvio padrão máximo do espaço de trabalho, ambos apresentados na tabela 52.

A incerteza combinada do dispositivo de medição de umidade relativa (u_{cur}) consiste no maior valor de incerteza combinada de um determinado sistema de medição de umidade relativa (u_{sur}). As incertezas combinada e expandida de cada sistema de medição de umidade relativa foram calculadas, segundo as equações 9 e 10, e os resultados foram apresentados na tabela 29.

A tabela 53, a seguir, apresenta os valores médios de umidade relativa de referência do espaço de trabalho (UR), os desvios padrões da repetitividade de umidade relativa (s_{rur}), os desvios padrões da reprodutibilidade de umidade relativa (s_{Rur}), as incertezas combinadas dos dispositivos de medição de umidade relativa (u_{cur}), as incertezas combinadas associadas aos valores médios de umidade relativa de referência do espaço de trabalho (u_{UR}) e as incertezas expandidas associadas aos valores médios de umidade relativa de referência do espaço de trabalho (U_{UR}).

Tabela 53 – Incertezas associadas aos valores médios de umidade relativa de referência do espaço de trabalho (%ur)

UR	S_{rur}	S_{Rur}	u_{cur}	U_{UR}	U_{UR}
27,6	0,3211	0,3860	0,086	0,395	0,8
43,3	0,2209	0,2779	0,130	0,307	0,6
58,9	0,4245	0,4768	0,173	0,507	1,0
74,5	0,8351	0,8917	0,215	0,917	1,8
89,8	0,4954	0,6501	0,255	0,698	1,4

Fonte: Elaboração própria

A tabela 54, 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 equivale 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 associada à umidade relativa média de referência do espaço de trabalho (U_{UR}).

Tabela 54 – Apresentação dos resultados em %ur (AFNOR)

UR_a	UR_c	UR	ΔUR_{in}	U_{UR}
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	1,8
90	89,9	89,8	-0,1	1,4

Fonte: Elaboração própria

3.6.8.2 Conforme o guia do DKD

A incerteza expandida da calibração da indicação de umidade relativa da câmara em relação ao espaço de trabalho (U_{URc}), conforme o guia DKD-R 5-7 (DKD, 2004), foi calculada utilizando-se das seguintes fontes: incerteza combinada do sistema de medição de umidade relativa (u_{sur}), incerteza devido à resolução da indicação de umidade relativa da câmara [$u(\delta UR_{res})$], incerteza devido à não homogeneidade espacial de umidade relativa [$u(\delta UR_{inhom})$], incerteza devido à instabilidade temporal de umidade relativa [$u(\delta UT_{instab})$], desvio padrão experimental da umidade relativa média do local de medição de referência [$u(\delta UR)$] e desvio

padrão experimental da umidade relativa média da câmara climática [$u(\delta UR_C)$]. Foi utilizado fator de abrangência $k=2$, o que fornece uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A seguinte equação foi então utilizada para o cálculo da incerteza expandida:

$$U_{UR} = k \times \sqrt{u_{sur}^2 + u(\delta UR_{res})^2 + u(\delta UR_{inhom})^2 + u(\delta UR_{instab})^2 + u(\delta UR)^2 + u(\delta UR_C)^2} \quad (56)$$

A incerteza combinada do sistema de medição de umidade relativa do local de referência (centro do espaço de trabalho) foi apresentada na tabela 29.

A incerteza devido à resolução da indicação de umidade relativa da câmara [$u(\delta UR_{res})$] foi estimada como sendo a metade do valor do dígito (0,1 %ur) e equivale a meia largura de uma distribuição de probabilidade retangular. Assim:

$$u(\delta UR_{res}) = \frac{0,1}{2 \times \sqrt{3}} = 0,0289 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (57)$$

Os valores de não homogeneidade espacial de umidade relativa (δUR_{inhom}) foram apresentados na tabela 35. As incertezas referentes a estes valores foram calculadas através da equação 6.

Os valores de instabilidade temporal de umidade relativa para todos os locais de medição (δUR_{instab}) foram apresentados na tabela 42. A incerteza referente à instabilidade temporal de umidade relativa do local de medição de referência (centro do espaço de trabalho) foi calculada, para cada ponto, através da equação 8.

O desvio padrão experimental da umidade relativa média do local de medição de referência [$u(\delta UR)$] 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 [$u(\delta UR_C)$] 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 tabela 55, a seguir, apresenta, para cada umidade relativa de ajuste (UR_a), a incerteza combinada do sistema de medição de umidade relativa do local de medição de referência (u_{sur}), a incerteza devido à resolução da indicação de

umidade relativa da câmara [$u(\delta UR_{res})$], a incerteza devido à não homogeneidade espacial de umidade relativa [$u(\delta UR_{inhom})$], a incerteza devido à instabilidade temporal de umidade relativa do local de medição de referência [$u(\delta UR_{instab})$], o desvio padrão experimental da umidade relativa média do local de medição de referência [$u(\delta UR)$], o desvio padrão experimental da umidade relativa média da câmara climática [$u(\delta UR_C)$], a incerteza combinada da calibração da indicação de umidade relativa da câmara em relação ao espaço de trabalho (u_{URc}) e a incerteza expandida da calibração da indicação de umidade relativa da câmara em relação ao espaço de trabalho (U_{URc}), calculada conforme a equação 56.

Tabela 55 – Incertezas combinadas e expandidas de umidade relativa (%ur)

UR_a	u_{sur}	u(δUR_{res})	u(δUR_{inhom})	u(δUR_{instab})	u(δUR)	u(δUR_C)	u_{URc}	U_{URc}
30	0,079	0,0289	0,2582	0,3766	0,0333	0,0277	0,466	0,93
45	0,120	0,0289	0,1957	0,2848	0,0224	0,0155	0,368	0,74
60	0,158	0,0289	0,2882	0,4486	0,0447	0,0314	0,560	1,12
75	0,195	0,0289	0,4230	1,1377	0,0868	0,0765	1,235	2,47
90	0,231	0,0289	0,5395	0,7280	0,0477	0,0407	0,938	1,88

Fonte: Elaboração própria

A tabela 56, 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 do local de medição de referência (UR_{I ref}), que corresponde ao centro de espaço de trabalho; a correção da indicação de umidade relativa (ΔUR_{in}), que equivale a diferença entre a umidade relativa média do local de medição de referência e a umidade relativa média da câmara climática; e a incerteza expandida da calibração da indicação de umidade relativa da câmara em relação ao espaço de trabalho (U_{URc}).

Tabela 56 – Apresentação dos resultados em %ur (DKD)

UR_a	UR_C	UR_{I ref}	ΔUR_{in}	U_{URc}
30	30,0	27,5	-2,5	0,9
45	45,0	43,3	-1,7	0,8
60	60,0	58,9	-1,1	1,1
75	75,0	74,6	-0,4	2,5
90	89,9	89,9	0,0	1,9

Fonte: Elaboração própria

3.6.8.3 Conforme o guia do SEE

A incerteza expandida da calibração da câmara climática, pelo método de análise do caso médio do guia *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003), foi calculada através da multiplicação da incerteza padrão combinada, determinada através da raiz quadrada da soma das incertezas ao quadrado, pelo fator de abrangência $k=2$, que fornece uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A seguinte equação foi então utilizada para o cálculo da incerteza expandida:

$$U_{UR} = k \times \sqrt{u_{sur}^2 + \delta_{Gur}^2 + \delta_{Fur}^2 + u(\delta UR)^2 + u(\delta UR_C)^2 + u(\delta UR_{res})^2} \quad (58)$$

Onde,

u_{sur} – Incerteza combinada do sistema de medição de umidade relativa

δ_{Gur} – Incerteza referente ao gradiente de umidade relativa

δ_{Fur} – Incerteza referente à flutuação de umidade relativa

$u(\delta UR)$ – Desvio padrão experimental da umidade relativa média de referência do espaço de trabalho

$u(\delta UR_C)$ – Desvio padrão experimental da umidade relativa média da câmara climática

$u(\delta UR_{res})$ – Incerteza devido à resolução da indicação de umidade relativa da câmara climática

A incerteza referente ao sistema de medição de umidade relativa foi determinada para cada local de medição e o maior valor obtido foi adotado. As incertezas combinadas dos sistemas de medição foram apresentadas na tabela 29.

Os gradientes de umidade relativa, apresentados na tabela 36, e as flutuações, apresentadas na tabela 43, baseiam-se numa distribuição normal pois são provenientes de um conjunto de medições.

Já o desvio padrão experimental da umidade relativa média de referência do espaço de trabalho 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 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 umidade relativa da câmara foi estimada como sendo a metade do valor do dígito e equivale a meia largura de uma distribuição de probabilidade retangular, conforme a equação 57.

A tabela 57, a seguir, apresenta, para cada ponto analisado, a umidade relativa média de referência do espaço de trabalho (UR), a incerteza referente ao sistema de medição de umidade relativa (u_{sur}), a incerteza referente ao gradiente de umidade relativa (δ_{Gur}), a incerteza referente à flutuação de umidade relativa (δ_{Fur}), o desvio padrão experimental da umidade relativa média de referência do espaço de trabalho [$u(\delta UR)$], o desvio padrão experimental da umidade relativa média da câmara climática [$u(\delta UR_C)$], a incerteza devido à resolução da indicação de umidade relativa da câmara [$u(\delta UR_{res})$], a incerteza combinada da calibração da câmara (U_{UR}) e a incerteza expandida da calibração da câmara (U_{UR}), calculada conforme a equação 58.

Tabela 57 – Incertezas combinadas e expandidas de umidade relativa (%ur)

UR	u_{sur}	δ_{Gur}	δ_{Fur}	$u(\delta UR)$	$u(\delta UR_C)$	$u(\delta UR_{res})$	U_{UR}	U_{UR}
27,58	0,086	0,23	0,32	0,0132	0,0277	0,0289	0,404	0,81
43,34	0,130	0,18	0,22	0,0093	0,0155	0,0289	0,316	0,63
58,91	0,173	0,24	0,42	0,0164	0,0314	0,0289	0,520	1,04
74,52	0,215	0,36	0,84	0,0307	0,0765	0,0289	0,940	1,88
89,80	0,255	0,46	0,50	0,0211	0,0407	0,0289	0,727	1,45

Fonte: Elaboração própria

A tabela 58, 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 equivale a diferença dentre 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 58 – Apresentação dos resultados em %ur (SEE)

UR_a	UR_C	UR	ΔUR_{in}	U_{UR}
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

Fonte: Elaboração própria

Para o cálculo da incerteza expandida do valor de umidade relativa ajustado na câmara (U_{URa}), pelo método da análise de pior caso, determinou-se a diferença entre a umidade relativa média de referência de cada local de medição do espaço de trabalho e a umidade relativa de ajuste. Foi adicionada à maior diferença encontrada (ΔUR_{max}), o dobro do seu valor de flutuação (δ_{Fur}) e a incerteza expandida do respectivo sistema de medição de umidade relativa (U_{sur}). A seguinte equação foi então utilizada:

$$U_{URa} = \Delta UR_{max} + 2 \times \delta_{Fur} + U_{sur} \quad (59)$$

A tabela 59, a seguir, apresenta para cada umidade relativa ajustada na câmara (UR_a), a maior diferença entre a umidade relativa média de referência de um local de medição e a umidade relativa de ajuste (ΔUR_{max}), a incerteza referente à flutuação (δ_{Fur}), a incerteza expandida do sistema de medição de umidade relativa (U_{sur}) e a incerteza expandida da umidade relativa ajustada (U_{URa}).

Tabela 59 – Incertezas associadas aos valores de umidade Relativa ajustados na câmara (%ur)

UR_a	ΔUR_{max}	δ_{Fur}	U_{sur}	U_{URa}
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

Fonte: Elaboração própria

4. CONSIDERAÇÕES

4.1 TERMOS E DEFINIÇÕES

O termo empregado na norma NF X15-140 (AFNOR, 2002) para o processo de avaliação de temperatura e umidade em câmaras é caracterização. Já nos guias DKD-R 5-7 (DKD, 2004) e *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003), o termo empregado para o mesmo processo é calibração. Todavia, na opinião do autor, os dois termos podem ser empregados, porém com enfoques distintos.

Calibração, conforme definição do VIM (INMETRO, 2003) apresentada no Capítulo 1 deste trabalho, consiste em um conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um sistema ou instrumento de medição e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões. Sendo assim, a calibração da câmara em temperatura e/ou umidade consiste na relação entre os valores indicados pelo equipamento e aqueles indicados pelos instrumentos padrões. Sendo que, os valores padrões podem ser obtidos em um local específico da câmara ou através de um conjunto de instrumentos padrões que representam um espaço de trabalho no interior do dispositivo. Ou seja, a calibração consiste na determinação da correção da indicação da câmara e na estimativa da incerteza de medição. Cabe ressaltar que, a calibração deve ser executada nas condições de interesse do usuário, uma vez que, não é adequado assumir que os resultados obtidos para uma dada condição são válidos para outras.

A caracterização consiste em efetuar todas as medições na câmara para determinar o seu real desempenho. A caracterização pode ser efetuada quando a câmara estiver com seu ambiente estabilizado ou não. Através da caracterização, diversos parâmetros metrológicos são obtidos, tais como: gradiente, flutuação, desvio, velocidade do ar, efeito da radiação das paredes, taxa de mudança da temperatura, tempo de recuperação após uma ação intencional (abertura de porta, corte do fornecimento de energia, etc.) e outros. A caracterização pode ser efetuada apenas para fornecer os dados necessários à calibração da câmara ou para fornecer estes e outros dados de interesse do usuário.

Já a verificação da câmara consiste na comparação dos resultados obtidos durante a caracterização com as especificações da câmara a fim de verificar se estas estão conformes ou não.

4.2 ANÁLISE DAS MEDIÇÕES E DOS RESULTADOS

Através das medições e dos resultados obtidos na câmara climática, diversas considerações sobre seu o comportamento podem ser feitas. Analisando-se as temperaturas médias de referência dos locais de medição apresentadas nas tabelas 9 e 10, verifica-se que as regiões mais quentes localizam-se no lado direito da câmara e que as regiões mais frias localizam-se, na maioria das vezes, no lado esquerdo.

A norma NF X15-140 (AFNOR, 2002) determina o gradiente da câmara através da diferença entre os valores médios máximo e mínimo, acrescidos das incertezas expandidas, e o gradiente máximo através da diferença entre os valores máximo e mínimo, acrescidos das incertezas expandidas dos sensores. Todavia, para fins de cálculo da incerteza expandida do valor médio, a heterogeneidade da câmara em relação ao espaço é caracterizada pelo cálculo do desvio padrão da reprodutibilidade (equação 16). Já o guia DKD-R 5-7 (DKD, 2004) estabelece que o gradiente (não homogeneidade espacial) é a maior diferença entre um local de medição e o local de referência. No caso do guia *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003), calcula-se para cada instante do período de medição o desvio padrão experimental das leituras e o maior valor encontrado é assumido como gradiente. Todavia, o gradiente da câmara pode ainda ser determinado de uma forma distinta das que foram descritas anteriormente, ou seja, calculando-se para cada instante a diferença entre os valores máximo e mínimo e adotando o maior valor como gradiente.

As tabelas 60 e 61, a seguir, apresentam, para cada ponto, a maior diferença obtida em um dado instante entre as temperaturas máxima e mínima.

Tabela 60 – Maior diferença de temperatura (°C): 0 °C a 30 °C

0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
0,647	0,309	0,270	0,267	0,229	0,186	0,142

Fonte: Elaboração própria

Tabela 61 – Maior diferença de temperatura (°C): 35 °C a 70 °C

35 °C	40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C	65 °C	70 °C
0,093	0,077	0,129	0,266	0,414	0,531	0,650	0,813

Fonte: Elaboração própria

A tabela 62, a seguir, apresenta, para cada ponto, a maior diferença obtida em um dado instante entre a umidade relativa máxima e a umidade relativa mínima.

Tabela 62 – Maior diferença de umidade relativa (%ur)

30 %ur	45 %ur	60 %ur	75 %ur	90 %ur
0,67	0,60	0,85	1,33	1,67

Fonte: Elaboração própria

Com relação à flutuação, a norma NF X15-140 (AFNOR, 2002) determina este parâmetro, para cada local de medição, através da diferença entre os valores máximo e mínimo; porém as incertezas expandidas dos sensores não são levadas em consideração. Na opinião do autor, tais valores poderiam ser considerados na determinação do parâmetro, da mesma forma como foram considerados no cálculo do gradiente máximo. Cabe ainda destacar que, para fins do cálculo da incerteza de medição, este parâmetro é determinado através do desvio padrão da repetitividade (equação 15) ou como sendo o maior desvio padrão obtido no espaço de trabalho. Já o guia DKD-R 5-7 (DKD, 2004) estabelece que a flutuação (instabilidade temporal) é a maior diferença entre uma medição do intervalo de medições e o valor médio. No caso do guia *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003), calcula-se para cada local de medição o desvio padrão experimental das leituras e o maior valor encontrado é assumido como flutuação. Independentemente do método de cálculo, através da análise dos dados apresentados no capítulo anterior, é possível concluir que as regiões do equipamento que na maioria das vezes apresentam as maiores flutuações de temperatura são o canto superior esquerdo e o canto inferior direito do plano traseiro do espaço de trabalho.

Analisando-se as medições de temperatura de ponto de orvalho realizadas no centro do espaço de trabalho, pode-se determinar, para cada ponto, a diferença entre o maior e o menor valor e o desvio padrão experimental das medições. Tais valores estão apresentados, a seguir, na tabela 63.

Tabela 63 – Análise da temperatura de ponto de orvalho no centro do espaço de trabalho (°C)

	Diferença entre o maior e o menor valor de temperatura de ponto de orvalho	Desvio padrão experimental
30 %ur	0,59	0,157
45 %ur	0,24	0,063
60 %ur	0,39	0,108
75 %ur	0,73	0,169
90 %ur	0,34	0,080

Fonte: Elaboração própria

A calibração da câmara permite determinar as correções de suas indicações em relação a um valor médio de referência do espaço de trabalho ou em relação à temperatura média de referência de um determinado local. Através dos valores apresentados no capítulo anterior, verifica-se que as correções necessárias à indicação de temperatura da câmara na faixa de 0 °C a 70 °C, em relação à temperatura média de referência do espaço de trabalho, variam de 0,02 °C a 0,79 °C, e de 0,01 °C a 0,76 °C, em relação à temperatura média de referência do local de referência (centro do espaço de trabalho).

No caso de umidade relativa, as correções necessárias à indicação na faixa de 30 %ur a 90 %ur (na temperatura de 20 °C), em relação à umidade relativa média de referência do espaço de trabalho, variam de -2,4 %ur a -0,1 %ur, e de -2,5 %ur a 0,0 %ur, em relação à umidade relativa média de referência do centro do espaço de trabalho.

Uma outra análise que pode ser feita sobre o comportamento da câmara é a de que as temperaturas médias de referência do centro do espaço de trabalho (centro da câmara) e as temperaturas médias de referência do espaço de trabalho são praticamente as mesmas. Através dos dados apresentados nas tabelas 9 e 10, verifica-se que, na faixa de 0 °C a 50 °C, a maior diferença foi de 0,01 °C e, na faixa de 55 °C a 70 °C, as diferenças ficaram entre 0,02 °C e 0,05 °C. Com isso, conclui-se que, no espaço de trabalho avaliado, o equipamento apresenta uma ótima homogeneização da atmosfera.

A fim de avaliar as incertezas expandidas de temperatura e umidade relativa, estimadas conforme a norma NF X15-140 (AFNOR, 2002) e os guias DKD-R 5-7 (DKD, 2004) e *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003), foi verificado a quantidade de medições que se encontravam dentro do intervalo definido pela incerteza e foi constatado que, em

todos os pontos de calibração, sempre mais do que 97,5% das medições estavam dentro do intervalo. Tais valores estão de acordo com as probabilidades de abrangência de aproximadamente 95% fornecidas pelo fator de abrangência $k=2$ que foi utilizado em todos os cálculos de incerteza expandida.

As incertezas expandidas calculadas pela norma da AFNOR, por estarem associadas aos valores médios de referência, não levaram em consideração as fontes de incerteza relativas à indicação da câmara (resolução e repetitividade das medições). No caso dos guias do DKD e do SEE, como as incertezas estão associadas às indicações da câmara, tais fontes de incerteza foram utilizadas. Se estas fontes tivessem sido utilizadas nos cálculos feitos pela norma AFNOR, as diferenças encontradas entre os valores determinados por este documento e pelos dois guias teriam sido ainda menores. Todavia, comparando-se as incertezas expandidas determinadas através da norma da AFNOR e dos guias do DKD e do SEE, nota-se que as diferenças são pequenas, mostrando assim a convergência que há entre os documentos.

Em certos casos, a incerteza expandida foi arredondada para baixo. Porém, em nenhum destes casos, o arredondamento diminuiu o valor numérico da incerteza de medição em mais de 5%.

Quando da avaliação da umidade relativa da câmara, a temperatura média de referência do espaço de trabalho no ponto 60 %ur a 20 °C foi de 20,50 °C e a temperatura média da câmara foi de 20,05 °C. Comparando-se estes valores com aqueles obtidos quando da avaliação de temperatura (tabela 9), verifica-se que as diferenças são muitas pequenas, ou seja, 0,01 °C de diferença na temperatura média de referência do espaço de trabalho e 0,03 °C de diferença na temperatura média da câmara. Com isso, conclui-se que a câmara possui uma boa aptidão de conservar constantes suas características metrológicas ao longo do tempo.

4.3 INSTRUMENTAÇÃO

Com relação à instrumentação, os tipos de termômetros e higrômetros recomendados na norma NF X15-140 (AFNOR, 2002) representam a grande parte dos instrumentos de suas áreas. Já os guias DKD-R 5-7 (DKD, 2004) e *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003) não se aprofundam muito neste tema; porém, através da leitura dos guias,

nota-se que devem ser utilizados na avaliação da câmara os mesmos tipos de instrumentos que foram recomendados na norma francesa.

Para calibração da câmara, podem ser utilizados instrumentos mais simples do que aqueles que foram utilizados na elaboração deste trabalho. Podem ser utilizados, por exemplo, termômetros de 0,01 °C de resolução e higrômetro de ponto de orvalho de 0,1 °C de resolução. A utilização de higrômetros de impedância elétrica (capacitivo ou resistivo) também é possível. Porém, deve-se ressaltar que, a medida que vai se utilizando instrumentos mais simples e com incertezas mais altas, maiores serão as incertezas da calibração da câmara. Sendo assim, um laboratório que planeja prestar este tipo de serviço deve avaliar cuidadosamente que tipo de instrumentação deve adquirir para atender às necessidades de seu público alvo.

Outro importante aspecto que deve ser considerado refere-se à aquisição das medições. Na calibração da câmara, 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*.

4.4 ANÁLISE DOS DOCUMENTOS TÉCNICOS

Quanto aos métodos de calibração, a norma NF X15-140 (AFNOR, 2002) e os guias DKD-R 5-7 (DKD, 2004) e *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003) descrevem, basicamente, dois métodos de calibração de câmara (climática ou térmica): com ou sem carga. No caso da norma da AFNOR e dos guias do DKD e do SEE, a calibração da câmara, com ou sem carga, é executada em relação ao espaço de trabalho; porém, no caso do guia do DKD, a calibração também pode ser executada em relação a um local de medição de referência, método este que só deve ser utilizado em casos específicos. O guia do SEE descreve ainda a possibilidade de calibrar a câmara durante sua utilização, o que é bastante útil quando se executa diversos ensaios ou se opera com cargas distintas.

No caso de calibração da câmara com carga, é imprescindível que o efeito da carga utilizada seja avaliado e considerado no cálculo de incerteza e que esta esteja devidamente discriminada no certificado de calibração do equipamento. Sendo assim, a calibração da câmara com carga só é oportuna quando o usuário opera sempre com cargas similares e com um mesmo arranjo, uma vez que o certificado de calibração só estará sendo válido para aquelas condições.

Com relação ao efeito da radiação, a norma NF X15-140 (AFNOR, 2002) não se aprofunda neste tema e descreve que este efeito deve ser avaliado conforme a norma NF EN 27726 (AFNOR, 1994). Já o guia DKD-R 5-7 (DKD, 2004) sugere quatro métodos pelo quais o efeito da radiação pode ser avaliado. O guia *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003) não contempla este parâmetro.

No certificado de calibração da câmara deve constar: a identificação do equipamento, tais como: fabricante, modelo, número de série e código do cliente; suas características, tais como: faixa de operação, resolução, dimensões internas, tipo e localização dos sensores; as informações pertinentes à calibração, tais como: pontos de calibração, condições ambientais, instrumentos e equipamentos utilizados, rastreabilidade e localização dos padrões de referência no interior da câmara; carga utilizada e seu posicionamento; o procedimento de medição, especificando o tempo para atingir a estabilização do ambiente, a quantidade e o intervalo entre as medições; e os resultados obtidos, especificando os valores médios dos locais de medição, os valores ajustados, os valores médios do espaço de trabalho ou do local de medição de referência, os valores médios das indicações da câmara, as correções das indicações, as incertezas expandidas, o fator de abrangência utilizado e outras avaliações acordadas com o usuário (gradiente, flutuação, efeito da carga, taxa de resfriamento e/ou aquecimento e outras). Esta lista não está completa, podendo haver outras informações relevantes que devam constar no certificado de calibração da câmara. O certificado deve incluir ainda as informações descritas na norma NBR ISO/IEC 17025 (ABNT, 2005), especialmente se o executor for um laboratório integrante à Rede Brasileira de Calibração.

Dentre os três documentos analisados, a norma NF X15-140 (AFNOR, 2002) é o único que faz referência à medição da velocidade do ar no interior da câmara. Porém, executar a medição de tal parâmetro no interior da câmara quando há carga no seu interior é muito difícil. Sendo assim, a norma só recomenda sua medição

quando a câmara está sem carga. Outra dificuldade na medição da velocidade do ar, é conhecer de antemão sua direção no interior do equipamento. Cabe ressaltar que, a câmara pode ser calibrada em temperatura e/ou umidade relativa independentemente da medição da velocidade do ar no seu interior.

A norma NF X15-140 (AFNOR, 2002) é também a única que descreve certas avaliações que podem ser feitas quando o ambiente no interior da câmara já está estável ou quando este está buscando sua estabilização. Tais testes são bastantes interessantes e podem ser de grande valia para o usuário do equipamento. O usuário pode ter interesse, por exemplo, em conhecer a temperatura mais alta ocorrida no interior da câmara quando esta estava buscando sua estabilização, de modo a verificar se esta alta temperatura causou algum impacto na amostra. Outro exemplo, pode ser o interesse do usuário em conhecer o período requerido para o ambiente retornar ao estado estável após uma abertura da porta da câmara ou o período que o equipamento levará para atingir uma temperatura limite que não danifique as amostras, no caso de falta de energia elétrica.

O guia DKD-R 5-7 (DKD, 2004) é o único dos três documentos que descreve a possibilidade de calibração de um local de medição individual da câmara, não estando assim a câmara calibrada por inteiro. Tal metodologia de calibração, na opinião do autor, não deve atender as necessidades de grande parte dos usuários de câmara, visto que, geralmente os usuários utilizam um certo espaço interno do equipamento e não apenas um ponto do seu interior.

O guia *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003) apresenta um método de calibração de câmara, denominado análise do pior caso, que é muito prático 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, quando da sua calibração. Porém, tal método só deve ser empregado quando a finalidade na qual a câmara se destina, não requer baixas incertezas.

Tanto a norma francesa NF X15-140 (AFNOR, 2002) quanto o guia alemão DKD-R 5-7 (DKD, 2004) e o guia britânico *A Guide to Calculating the Uncertainty of the Performance of Environmental Chambers* (SEE, 2003) foram elaborados por comitês compostos por membros com experiência nos campos de termometria e

higrometria e foram publicados por organismos que gozam de credibilidade. Todos os três documentos são de fácil entendimento e aplicação. A apresentação de um item com definições, um com documentos de referência e anexos com exemplos de avaliações no interior da câmara são características inerentes aos três. Tais itens facilitam a interpretação dos documentos e apontam caminhos que possibilitam desenvolver-se no tema e em assuntos correlatos.

5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho, três metodologias de avaliação de temperatura e/ou umidade em câmaras (climáticas ou térmicas) foram analisadas. Com base no referencial teórico, na análise experimental e nas considerações finais, as conclusões, a seguir, podem ser apresentadas:

- câmaras climáticas e câmaras térmicas são utilizadas em vários segmentos industriais e centros de pesquisas para os mais diversos fins. Em muitos casos, é de extrema relevância que as medições de temperatura e/ou umidade executadas nestes equipamentos sejam confiáveis. Sendo assim, a calibração de tais equipamentos torna-se fundamental;
- a calibração/caracterização da câmara permite ao usuário conhecer o seu desempenho e suas características metrológicas, tais como: gradientes, flutuações, correções e outras;
- a calibração da câmara sustenta os resultados dos testes realizados no seu interior;
- a calibração da câmara contribui para o atendimento de requisitos do sistema de gestão da empresa;
- com base na pesquisa e na análise dos três documentos que tratam da calibração/caracterização de câmaras, pode-se concluir que as diferenças existentes estão geralmente relacionadas no modo como determinados parâmetros metrológicos são avaliados;
- comparando-se os resultados obtidos através dos três documentos que tratam da calibração/caracterização de câmaras, nota-se que as diferenças são pequenas, evidenciando assim a convergência que há entre os documentos;
- a elaboração deste trabalho é uma das formas de aumentar a conscientização dos usuários de câmara sobre a importância de calibrar seus equipamentos.

5.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

As seguintes sugestões podem ser indicadas para trabalhos futuros:

- avaliação da velocidade do ar no interior da câmara e seus efeitos na homogeneização do ambiente;
- avaliação dos efeitos da radiação no interior da câmara;
- avaliação de temperatura e umidade em outros tipos de câmaras;
- avaliação da distribuição de umidade absoluta no interior da câmara climática.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5390**: Generalidades sobre os ensaios climáticos e mecânicos. Rio de Janeiro, 1977.

_____. **NBR ISO 9001**: Sistemas de gestão da qualidade – Requisitos. Rio de Janeiro, 2000.

_____. **NBR ISO 14001**: Sistemas de gestão ambiental – Requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR ISO/IEC 17025**: Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR ISO 10012**: Sistemas de gestão de medição – Requisitos para os processos de medição e equipamento de medição. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 12771**: Termopares – Tabelas de referência. Rio de Janeiro, 1999.

_____. **Artigo do CB-38 para a Revista Meio Ambiente Industrial – Nov./Dez. 2004**. Disponível em: <http://www.abnt.org.br/cb38/ArtigoRMAINov_Dez_2004.pdf>. Acesso em: 14 de novembro de 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS & INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Guia para a Expressão da Incerteza de Medição**. 3. Ed. Rio de Janeiro, 2003.

ACTIS A.; CAROTENUTO A.; DELL'ISOLA, M. Humidity sensor calibration in a secondary laboratory. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TEMPERATURE AND THERMAL MEASUREMENTS IN INDUSTRY AND SCIENCE, 6, 1996, Torino. **Proceedings...** Torino: Levrotto & Bella, 1997. p. 595-601.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION (AFNOR). **NF EN 5725-2**: Application of statistics – Accuracy (trueness and precision) of measurements methods and results – Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method. França, 1994.

_____. **NF EN 27726**: Thermal environments. Equipment and measurement methods for physiological parameters. França, 1994.

_____. **NF EN 60068-1**: Environmental testing. Part 1: General and guidance. França, 1995.

_____. **NF X15-140**: Measurement of air moisture – Climatic and thermostatic chambers – characterisation and verification. França, 2002.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Resolução RDC Nº 210**: Regulamento técnico das boas práticas para a fabricação de medicamentos, de

14 de agosto de 2003. Disponível em: <<http://www.anvisa.gov.br>>. Acesso em: 20 de maio de 2005.

_____. **Resolução RE Nº 398**: Guia para a realização de estudos de estabilidade, de 12 de Novembro de 2004. Disponível em: <<http://www.anvisa.gov.br>>. Acesso em: 20 de maio de 2005.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **ASHRAE 41.6**: Method for measurement of moist air properties. Atlanta, 1994.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **E 1137-97**: Standard specification for industrial platinum resistance thermometers. 2001.

_____. **Special Publication 470A**: Manual on the use of thermocouples in temperature measurement. 1974.

BENTLEY, R. **Temperature and Humidity Measurement**: Handbook of temperature measurement. Australia: Springer-Verlag Singapore, 1998, v.1.

BOJKOVSKI, J., HUDOKLIN, D., DRNOVSEK, J. Automated system for evaluation of humidity and temperature profiles in climatic chambers. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HUMIDITY AND MOISTURE, 4, 2002, Taipei. **Proceedings...** Taipei: CMS, 2002. p. 173-178.

BRIONIZIO, J. D.; LIMA, S. G., MAINIER, F. B. Comparação intralaboratorial em higrometria. In: ENCONTRO PARA A QUALIDADE DE LABORATÓRIOS – ENQUALAB, 2005, São Paulo. **Anais...** São Paulo: REMESP, 2005. 1 CD-ROM.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI). **BS 1339-1**: Humidity – Part 1: Terms, definitions and formulae. Londres, 2002.

CARVALHO, A. D.; NEVES, J. A. Causas fundamentais das dificuldades na implementação da NBR ISO/IEC 17025 em laboratórios de calibração. In: CONGRESSO METROLOGIA-2003, 2003, Recife. **Anais...** Recife: SBM, 2003. 1 CD-ROM.

CHARLES, K. E. **Fanger's thermal comfort and draught models**. Ottawa: Institute for Research in Construction, Research Report 162, 29 p., 2003. Disponível em <<http://www.irc.nrc-cnrc.gc.ca/ircpubs>>. Acesso em: 16 de maio de 2005.

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST (DKD). **DKD-R 5-7**: Kalibrierung von Klimaschränken. 2004.

DIAS, João Batista. **Construção e validação de uma bancada para calibração de sensores para determinação da umidade relativa do ar**. 2001. 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2001.

FERNICOLA, V. C., BANFO, M. The humidity facility for hygrometry calibration at the IMGC-CNR. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TEMPERATURE AND THERMAL MEASUREMENTS IN INDUSTRY AND SCIENCE, 8, 2001, Berlim. **Proceedings...** Berlim: VDE VERLAG, 2002. p. 751-756.

FILHO, Oscar Bahia. Implantação de sistemas de qualidade em laboratórios de ensaios. **Revista Analytica**. São Paulo, ano 2, n. 3, p. 24-28, fev./mar. 2003.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO RIO DE JANEIRO (FIRJAN). **Qualidade & Produtividade e sua Relação com os Sistemas de Gestão**. Disponível em <<http://www.firjan.org.br/notas/media/Paper1.pdf>>. Acesso em 18 de outubro de 2005.

FRIEDERICI, S.; TEGELER, E. Radiation effects and its consequences on measurements in climatic chambers. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TEMPERATURE AND THERMAL MEASUREMENTS IN INDUSTRY AND SCIENCE, 9, 2004, Dubrovnik. **Proceedings...** Zagreb: LPM/FSB. p. 795-800.

GENERAL EASTERN. **Humidity handbook**, 1993.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 3 ed. São Paulo: Atlas, 1991.

GÜTHS, S.; PAULO, V. **Instrumentação em ciências térmicas**. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. 1998. Apostila.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 60068-2-1: Environmental testing – Part 2: tests – test A: cold**, 1990.

_____. **IEC 60068-2-2: Environmental testing – Part 2: tests – test B: dry heat**, 1974.

_____. **IEC 60068-3-5: Environmental testing – Part 3-5: supporting documentation and guidance – confirmation of the performance of temperature chambers**, 2001.

_____. **IEC 60068-3-6: Environmental testing – Part 3-6: supporting documentation and guidance – confirmation of the performance of temperature/humidity chambers**, 2001.

_____. **IEC 60068-3-7: Environmental testing – Part 3-7: supporting documentation and guidance – measurements in temperature chambers for tests A and B (with load)**, 2001.

_____. **IEC 60751: Industrial platinum resistance thermometer sensors**, 1983.

INSTITUTE OF MEASUREMENT AND CONTROL (IMC). **A guide to the measurement of humidity**. 1996.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). **Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia – VIM**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **Credenciamento**. Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br>>. Acesso em 29 de maio de 2005 e em 24 de novembro de 2005.

_____. **NIT-LAHIG-004**: Procedimento de Manuseio, Transporte, Armazenamento, Uso e Manutenção dos Padrões de Referência. Revisão 00, Duque de Caxias, 2003.

_____. **NIT-LAHIG-005**: Manuseio, Transporte, Armazenamento, Uso, Avaliação e Manutenção da Câmara Climática. Revisão 00, Duque de Caxias, 2003.

_____. **NIT-LAHIG-009**: Verificação Intermediária dos Padrões de Referência. Revisão 00, Duque de Caxias, 2003.

_____. **Diretrizes estratégicas para a metrologia brasileira 2003-2007**. Documento final aprovado na 24^a reunião do Comitê Brasileiro de Metrologia (CBM) em 29 de janeiro de 2003.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO), ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) & SOCIEDADE BRASILEIRA DE METROLOGIA (SBM). **Expressão da incerteza de medição na calibração**: Versão brasileira do documento de referência EA-4/02". Rio de Janeiro, 1999.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO/IEC 17025**: General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, 2005.

JORGE, Antônio Olavo Cardoso. Princípios de biossegurança em odontologia. **Revista Biociências**, v. 8, n. 1, 2002.

LUCATELLI, M. V. O papel da metrologia na gestão da manutenção hospitalar. In: CONGRESSO METROLOGIA-2003, 2003, Recife. **Anais...** Recife: SBM, 2003. 1 CD-ROM.

MARINHO, V. M. C. A metrologia na formação do engenheiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METROLOGIA-METROLOGIA 2000, 2000, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SBM, 2000. p. 336-344.

MATTAR, F. N. **Pesquisa de Marketing**. 6 ed., v. 1. São Paulo: Atlas, 2005.

MEDEIROS, M.; MEDEIROS, F.; FIDÉLIS, G. C. NBR ISO/IEC 17025: Os laboratórios viverão sem ela?. **Revista Metrologia & Instrumentação**. São Paulo, ano 3, n. 25, outubro, 2003. p. 06-09.

MESQUITA, R. L. C. Gestão da tecnologia das medições nas organizações. In: CONGRESSO METROLOGIA-2003, 2003, Recife. **Anais...** Recife: SBM, 2003. 1 CD-ROM.

NIELSEN, J.; BARENDREGT, C. The use of thermistors for establishing the temperature conditions in a climatic chamber". In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM

ON TEMPERATURE AND THERMAL MEASUREMENTS IN INDUSTRY AND SCIENCE, 9, 2004, Dubrovnik. **Proceedings...** Zagreb: LPM/FSB. p. 781-786.

NÓBREGA, M. V.; SILVA, J. F. Verificação e calibração em unidades eletrocirúrgicas na Paraíba: Um estudo de caso. In: CONGRESSO METROLOGIA-2003, 2003, Recife. **Anais...** Recife: SBM, 2003. 1 CD-ROM.

OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY ASSESSMENT SERIES (OHSAS). **OHSAS 18001/1999**: Sistema de gestão de segurança e saúde ocupacional – Especificação. Apostila do Mestrado em Sistema de Gestão, Universidade Federal Fluminense (Professor Gilson Brito, D. Sc.), Niterói, 2003.

ORLANDO, A. F. Calibração de um termômetro PT-100 como padrão de trabalho de um laboratório de serviços metrológicos. In: CONGRESSO METROLOGIA-2003, 2003, Recife. **Anais...** Recife: SBM, 2003. 1 CD-ROM.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (PTB). Disponível em <<http://www.ptb.de>>. Acesso em 09 de julho de 2005.

QUINN, T. J. **Temperature**. London: Academic Press Inc., 1983.

REINSHAUS, P., WERNER, B., FRIEDERICI, S. Calibration of environmental chambers methods and uncertainties. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TEMPERATURE AND THERMAL MEASUREMENTS IN INDUSTRY AND SCIENCE, 9, 2004, Dubrovnik. **Proceedings...** Zagreb: LPM/FSB. p. 787-793.

REVISTA DIVERSA (UFMG). **Tecnologia na Medida**. Ano 1. n. 1, 2002. Disponível em: <<http://www.ufmg.br>>. Acesso em 16 de maio de 2005.

REVISTA METROLOGIA & INSTRUMENTAÇÃO. **Quem é Quem na Qualidade no Brasil**. Ano 4, n. 32, out./nov. 2004.

SANDRES, Gisele Carvalho. Contaminação dos solos e águas subterrâneas provocada por vazamentos de gasolina nos postos de combustíveis devido à corrosão em tanques enterrados. 2004. Dissertação (Mestrado Profissional em Sistemas de Gestão). Departamento De Engenharia de Produção, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2004.

SANTOS, P. R. F., PETKOVIC, S. G. **Curso de Termometria de Contato**. Duque de Caxias, RJ, 2003.

SOCIETY OF ENVIRONMENTAL ENGINEERS (SEE). **A guide to calculating the uncertainty of the performance of environmental chambers**. 2003.

_____. Disponível em <<http://www.environmental.org.uk>>. Acesso em 09 de julho de 2005.

WIEDERHOLD, P. R., **Water vapor measurement: Methods and instrumentation**. New York: Marcel Dekker, Inc., 1997.