

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE CONFORTO TÉRMICO E A INFLUÊNCIA DA
RENOVAÇÃO DE AR EM SALAS DE AULA DE ESTUDANTES UNIVERSITÁRIOS**

NILMAR LUÍS ARENHARDT

Dissertação de Mestrado

**SÃO LEOPOLDO
2017**

ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE CONFORTO TÉRMICO E A INFLUÊNCIA DA
RENOVAÇÃO DE AR EM SALAS DE AULA DE ESTUDANTES UNIVERSITÁRIOS

Nilmar Luís Arenhardt

Trabalho submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UNISINOS como pré-requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Wander - UNISINOS

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes - UNISINOS

Prof. Dr. João Batista Dias - UNISINOS

Prof.^a Dr.^a Renata De Vecchi - UFSC

A681a Arenhardt, Nilmar Luís.

Análise das condições de conforto térmico e a influência da renovação de ar em salas de aula de estudantes universitários / Nilmar Luís Arenhardt. – 2017.

91 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2017.

“Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Wander.”

1. Engenharia mecânica. 2. Conforto térmico. 3. Renovação de ar. 4. Sala de aula. I. Título.

CDU 621

AGRADECIMENTOS

Durante o período deste trabalho contei com o apoio e colaboração de algumas pessoas a quem gostaria de expressar o meu sincero agradecimento:

Ao meu orientador, professor Dr. Paulo Roberto Wander, pela confiança depositada em mim e no meu trabalho, pelos ensinamentos durante o mestrado e pela valiosa orientação.

À minha querida esposa, Bruna, pela amizade, amor, companheirismo e paciência nos momentos de ausência e também durante os intermináveis cliques do mouse em inúmeras noites de “sono”.

Aos meus pais, Sr. Antônio e Sr.^a Elsa pelo apoio, carinho e pelo exemplo de vida, bem como aos irmãos Sandro e Daniel, pela amizade incontestável e pelos conselhos técnicos e científicos.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, por todas as conversas, conselhos e amizade, bem como à colega Josiane do ITT Performance pela disposição e auxílio com os equipamentos utilizados na realização do experimento de campo deste trabalho.

À todos os alunos e professores participantes desta pesquisa, que responderam pacientemente aos questionários e tiveram fundamental importância para a realização deste trabalho. Também à Amanda, aluna bolsista IC do curso de Engenharia de Energia, por toda a ajuda durante as atividades de campo.

À empresa S&P Brasil Ventilação LTDA, na pessoa do Sr. Carlos Ehlers, pela confiança e pela parceria que foi fundamental para a realização desta pesquisa, bem como à empresa Kiare Metalúrgica, pelo apoio e disponibilidade prestados.

A CAPES pela concessão da bolsa (taxa) de estudos, que viabilizou a realização deste trabalho.

RESUMO

Apesar de muitas vezes as condições climáticas serem favoráveis para alcançar o conforto térmico em edificações que operam com o uso da ventilação natural, o número de edifícios que recorrem ao resfriamento mecânico, por exemplo aos condicionadores de ar, como principal estratégia de climatização tem aumentado consideravelmente. Além de problemas devido ao elevado consumo de energia, alguns estudos apontam que essa situação pode proporcionar uma má qualidade do ar interior, o que para o caso de ambientes de ensino pode ser gravemente prejudicial. Em contrapartida, o uso da ventilação mecânica pode gerar um efeito significativo no resfriamento interno com um consumo inferior de energia e com melhores taxas de renovação de ar. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo principal analisar a influência da renovação de ar no conforto térmico de estudantes universitários, comparando resultados de medições de campo e de pesquisas subjetivas em salas de aula com ventilação natural e uma sala com sistema de ventilação mecânica. Os experimentos de campo foram realizados em salas do *campus* da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos) em São Leopoldo-RS, com ênfase na estação mais quente do ano. Os dados foram coletados a partir de medições ambientais realizadas concomitantemente às pesquisas subjetivas, que foram realizadas por meio de um questionário entregue aos estudantes, ocupantes dos ambientes avaliados, resultando em um total de 616 questionários. As análises foram realizadas a partir das informações obtidas, sendo os resultados apresentados em forma de gráficos e tabelas, através do cruzamento entre os dados microclimáticos e as respostas dos usuários. Os resultados mostraram que a sensação térmica dos ocupantes da sala com sistema de ventilação mecânica foi mais satisfatória quando comparados aos usuários das demais salas avaliadas. Em relação a aceitabilidade térmica nos dias de avaliação comparativa, 72,5% dos ocupantes da sala com maior renovação de ar classificaram o ambiente como “aceitável” e 27,5% como “inaceitável”. Nas demais salas apenas 40% dos ocupantes classificaram o ambiente como “aceitável” e 60% como “inaceitável”. O estudo também mostrou, para os meses da estação mais quente, uma melhor aplicabilidade do modelo de conforto adaptativo na sala de aula com índices mais elevados de vazão de ar externo. Os resultados encontrados evidenciam ainda que o aumento da taxa de renovação de ar na sala de aula proposta, em conjunto com as ações adaptativas dos ocupantes, proporcionou melhores condições de conforto térmico quando comparada às salas com ventilação natural.

Palavras-chave: Conforto térmico. Renovação de ar. Sala de aula.

ABSTRACT

Although many times the climate conditions are appropriate to achieve thermal comfort in buildings that operate with natural ventilation, the number of buildings that apply mechanical cooling, for example the air conditioning, as main climatization strategy have increased considerably. Besides problems in consequence to the elevated energy consumption, some studies show that this situation can provide a bad indoor air quality (IAQ), which in case of teaching environments can be seriously harmful. On the other hand, the use of mechanical ventilation can generate a significant effect at inside cooling with lower energy consumption and with better air renewal rate. Therefore, this study aims to analyze the influence of air renewal at university students' thermal comfort, comparing results of field measurements and subjective searches in classrooms with natural ventilation and a classroom with mechanical ventilation system. The field experiments were carried out in classrooms on the campus of the Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos) in São Leopoldo city, with emphasis at the warmest season of the year. The data were collected from environmental measurements carried out concomitantly with subjective surveys, which were performed through a questionnaire delivered to the students, occupants of the evaluated environments, resulting in a total of 616 questionnaires. The analysis was carried out from the obtained information, and the results presented in the form of graphs and tables, through the crossing between the microclimatic data and the users' answers. The results showed that the classroom occupants with mechanical ventilation presented more satisfactory thermal sensation, comparing to users of other evaluated classrooms. In relation to thermal acceptability in comparative days evaluated, 72.5% of the occupants in classroom with greater air renewal classified the environment as "acceptable" and 27.5% as "unacceptable". For the other classrooms, only 40% of the occupants classified the environment as "acceptable" and 60% as "unacceptable". The study also showed, at the months in warmest season, a better applicability of the adaptive comfort model in the classroom with higher rates of external airflow. The results also show that the increase of the air renewal rate in the proposed classroom, together with the adaptive actions of the occupants, provided better conditions of thermal comfort when compared to the rooms with natural ventilation.

Keywords: Thermal comfort. Air renewal. Classroom

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - PPD em função do PMV	20
Figura 2.2 - Intervalos aceitáveis de temperatura operativa para ambientes naturalmente condicionados	22
Figura 2.3 - Intervalo de temperatura operativa e velocidade média do ar para 1,0 e 0,5 clo de acordo com a velocidade do ar do método gráfico para altas velocidades do ar.....	24
Figura 2.4 - Publicações por ano na base Scopus.....	26
Figura 2.5 - Publicações por ano na base WOS	27
Figura 3.1 - Imagens da sala C06108	34
Figura 3.2 - Localização dos prédios no <i>campus</i> da Unisinos.....	34
Figura 3.3 - Planta baixa da sala C06108	35
Figura 3.4 - Ventilador Helicocentrífugo modelo TD 2000/315 SILENT	36
Figura 3.5 - Parede norte e corredor da edificação típica.....	37
Figura 3.6 - Ventiladores montados na sala C08108.....	37
Figura 3.7 - Cargas térmicas e método de distribuição do ar na sala C08108.....	38
Figura 3.8 - Medição de pressão dinâmica do ventilador.....	43
Figura 3.9 - Medição do nível de pressão sonora na sala C08108	44
Figura 3.10 - Protocolo de medição durante os dias de pesquisa	47
Figura 4.1 - Frequência de usuários masculinos e femininos durante as pesquisas	53
Figura 4.2 - Sensação Térmica dos usuários de acordo com os valores de temperatura operativa nas salas comparativas	58
Figura 4.3 - Sensação Térmica dos usuários de acordo com os valores de temperatura operativa na sala C08108.....	59
Figura 4.4 - Sensação Térmica dos usuários de acordo com os valores de temperatura operativa nas medições 1 a 4	60
Figura 4.5 - Sensação térmica dos usuários em relação ao gênero.....	61
Figura 4.6 - Índice “clo” de usuários do sexo masculino de acordo com a temperatura operativa nas salas comparativas	62
Figura 4.7 - Índice “clo” de usuários do sexo feminino de acordo com a temperatura operativa nas salas comparativas.....	63
Figura 4.8 - Índice “clo” de usuários do sexo masculino de acordo com a temperatura operativa na sala C08108.....	63

Figura 4.9 - Índice “clo” de usuários do sexo feminino de acordo com a temperatura operativa na sala C08108	64
Figura 4.10 - Comparação entre as salas de acordo com a sensação térmica (AMV médio) em função da temperatura operativa durante as medições	65
Figura 4.11 - Preferência térmica dos usuários de acordo com a temperatura operativa nas salas comparativas	67
Figura 4.12 - Preferência térmica dos usuários de acordo com a temperatura operativa na sala C08108	68
Figura 4.13 - Comparação entre o PMV médio e o AMV médio nas salas comparativas	69
Figura 4.14 - Comparação entre o PMV médio e o AMV médio na sala C08108.....	69
Figura 4.15 - Temperatura operativa interna em função da temperatura média do ar exterior para as salas avaliadas	70
Figura 4.16 - Sensação térmica dos usuários em função do índice de vazão de ar externo para a sala C08108	74
Figura 4.17 - Preferência e aceitabilidade dos ocupantes em relação ao movimento do ar na sala C08108 em função do índice de vazão de ar externo.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Escala de sensação térmica.....	19
Tabela 3.1 - Instrumentos para medição dos parâmetros ambientais	39
Tabela 3.2 - Instrumentos para medição dos parâmetros dos ventiladores	40
Tabela 4.1 - Características técnicas verificadas nos ventiladores instalados na sala C08108	49
Tabela 4.2 - Configurações disponíveis quanto aos valores de vazão de ar do sistema de ventilação mecânica na sala C08108	50
Tabela 4.3 - Índices de vazão de ar externo na sala C08108.....	51
Tabela 4.4 - Síntese das medições realizadas	52
Tabela 4.5 - Caracterização dos participantes da pesquisa.....	54
Tabela 4.6 - Valores de temperatura interna e externa do ar nas salas avaliadas.....	55
Tabela 4.7 - Aceitabilidade térmica e percentual de insatisfeitos nas salas avaliadas	72

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMV	<i>Actual Mean Vote</i>
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
APD	<i>Actual Percentage Dissatisfied</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
EES	<i>Engineering Equation Solver</i>
HVAC	<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i>
ISO	<i>International Standard Organization</i>
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
NR	Norma Regulamentadora
PCS	<i>Personal Comfort System</i>
PEC	<i>Personal Environmental Control</i>
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i>
PPD	<i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i>
PV	<i>Personal Ventilation</i>
RBC	Rede Brasileira de Calibração
VL	Velocidade Lenta
VR	Velocidade Rápida
WOS	<i>Web of Science</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área do duto [m ²]
AMV	<i>Actual Mean Vote</i>
APD	<i>Actual Percentage Dissatisfied</i> [%]
D	Diâmetro do globo [m]
f_{cl}	Fator de área superficial das roupas
h_c	Coefficiente de transferência de calor por convecção [W/(m ² °C)]
I	Corrente elétrica [A]
I_{cl}	Isolamento térmico das roupas [m ² K/W]
L_{PA}	Nível de pressão sonora [dB]
M	Taxa metabólica [W/m ²]
n	Número de medições realizadas
p_a	Pressão de vapor no ar [Pa]
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i>
PPD	<i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i> [%]
P_v	Pressão de velocidade ou pressão dinâmica [Pa]
P_{vr}	Pressão de velocidade medida em um ponto transversal no duto [Pa]
t_a	Temperatura do ar [°C]
t_{bn}	Temperatura de bulbo úmido ventilado naturalmente [°C]
t_{bs}	Temperatura de bulbo seco [°C]
t_c	Temperatura de conforto [°C]
t_{cl}	Temperatura superficial das roupas [°C]
t_{ext}	Temperatura exterior [°C]
t_g	Temperatura de globo [°C]
$\overline{t_{mpa(ext)}}$	Temperatura média predominante do ar externo [°C]
\bar{t}_r	Temperatura radiante média [°C]
t_o	Temperatura operativa [°C]
U_r	Umidade relativa do ar [%]
\dot{V}	Vazão no plano transversal de Pitot [m ³ /s]
V	Tensão elétrica [V]
v_{ar}	Velocidade relativa do ar [m/s]
$V_{med\ ar}$	Velocidade média do ar no duto [m/s]

W	Trabalho ou potência mecânica eficaz [W/m ²]
\dot{W}_{eletr}	Potência elétrica [W]
ρ	Massa específica do ar [kg/m ³]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Objetivos.....	15
1.1.1 Objetivo Geral	15
1.1.2 Objetivos Específicos	15
1.2 Justificativa	15
1.3 Estrutura da Pesquisa	16
2 O CONFORTO TÉRMICO.....	17
2.1 Conforto térmico segundo o modelo estático	18
2.2 Conforto térmico segundo o modelo adaptativo.....	21
2.3 Conforto térmico nas instituições de ensino.....	25
2.3.1 Um panorama sobre os estudos relacionados ao conforto térmico em instituições de ensino.....	26
2.3.2 Ventilação e qualidade do ar interior nas instituições de ensino.....	28
2.4 Normas de conforto térmico e qualidade do ar interno no Brasil	31
3 MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1 Ambientes de medição.....	34
3.2 Instrumentos de medição	39
3.3 Pesquisas subjetivas nas salas de aula	41
3.4 Procedimentos de medição.....	42
3.4.1 Medição dos parâmetros dos ventiladores do sistema de ventilação mecânica	42
3.4.2 Medição dos parâmetros ambientais: análise operacional preliminar.....	45
3.4.3 Medição dos parâmetros ambientais: protocolo de medições	46
3.5 Análise dos dados.....	48
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
4.1 Características do sistema de ventilação mecânica – sala C08108.....	49
4.2 Síntese dos dados obtidos durante as medições	51
4.2.1 Caracterização dos usuários participantes das pesquisas	53
4.2.2 Caracterização das variáveis ambientais	54
4.3 Condições de conforto térmico nas salas de aula avaliadas.....	57
4.3.1 Análise da sensação térmica nas salas avaliadas.....	57
4.3.2 Análise da preferência térmica nas salas avaliadas	67
4.3.3 Análise dos índices PMV em relação aos índices AMV.....	68

4.3.4 Análise do conforto pelo modelo adaptativo.....	70
4.3.5 Análise da aceitabilidade térmica nas salas avaliadas.....	71
4.4 Influência da renovação de ar na sala C08108	74
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
5.1 Limitações do trabalho.....	78
5.2 Recomendações para trabalhos futuros	79
REFERÊNCIAS	80
APÊNDICE A	87
APÊNDICE B.....	89
APÊNDICE C	90
APÊNDICE D	91

1 INTRODUÇÃO

Em tempos onde as mudanças climáticas e uma maior frequência de dias com altas temperaturas ao longo do ano estão sendo constantemente observadas, as discussões relacionadas ao conforto térmico dos ambientes têm sido mais recorrentes em diferentes contextos e em diferentes áreas do conhecimento, ultrapassando as fronteiras da área da engenharia.

Historicamente, o homem sempre procurou o seu bem-estar e o conforto e à medida que novas e acessíveis tecnologias surgem, faz com que sejam buscadas sempre melhores condições ambientais e melhor qualidade de vida. Conforme Frota e Schiffer (2003), o homem tem melhores condições de vida e de saúde quando seu organismo pode funcionar sem ser submetido à fadiga ou ao estresse, inclusive ao estresse térmico.

Independentemente do ambiente, o conforto térmico tem um efeito muito significativo no bem-estar das pessoas. Ao se analisar um local de trabalho, por exemplo, verifica-se que uma situação de desconforto térmico pode refletir diretamente no rendimento de um trabalhador. Por ser um fator psicológico, o conforto térmico pode afetar o moral dos ocupantes, prejudicando a comodidade e a produtividade das pessoas que se sentirem termicamente insatisfeitas (BARBHUIYA; BARBHUIYA, 2013).

Recentemente, houve um importante aumento no número de pesquisas relacionadas ao conforto térmico em instituições de ensino e ao que tudo indica, isso se deve aos mesmos motivos que se discutem questões deste tema em demais ambientes como a indústria e as edificações comerciais e residenciais. O conforto térmico é um fator relevante do ambiente interior, não apenas devido a percepção térmica dos ocupantes, mas também porque está diretamente relacionado ao consumo de energia de uma edificação, questão de extrema importância no cenário atual. O setor de edificações, por exemplo, é responsável por aproximadamente 48% da energia elétrica consumida no Brasil (EPE, 2016)

Nas edificações, que compreendem basicamente os setores residencial e comercial, grande parte da energia consumida é destinada a prover conforto ambiental aos seus usuários por meios de sistemas artificiais de iluminação e de climatização e estima-se que existe um potencial técnico de economia de 25% em edificações já existentes, percentual este que pode até dobrar ao considerar-se a eficiência energética das novas edificações desde a concepção do projeto (PROCEL, 2014).

Em relação às edificações de instituições de ensino, mais precisamente às salas de aula, Krüger e Zannin (2004) lembram que os projetistas e construtores devem estar cientes de

que fatores ambientais do próprio prédio ou edifício vão afetar no processo de ensino e aprendizagem. Para os autores, o desconforto térmico nestes ambientes, como por exemplo salas de aula superaquecidas ou excessivamente frias, pode ser associado ao estresse físico (estresse térmico) e, portanto, ser responsável por indisposições e mau desempenho dos alunos. Ainda em relação à esta questão, Barbhuiya e Barbhuiya (2013) comentam que o conforto térmico em edifícios destinados ao ensino, em particular, é de extrema importância. Isso ocorre porque o desconforto térmico em tais construções pode criar condições insatisfatórias, tanto para os funcionários quanto para os alunos, o que pode se tornar uma distração para os ocupantes do ambiente, que ficam suscetíveis à redução de performance e de produtividade.

Diante desse contexto, torna-se importante ampliar o conhecimento referente ao tema conforto térmico em instituições de ensino e enumerar os diversos aspectos relacionados, uma vez que trata-se de um assunto de fundamental importância para a engenharia, pois o mesmo é associado ao projeto de climatização da edificação escolar, onde questiona-se, por exemplo, se sistemas passivos são suficientemente eficazes para garantir o conforto térmico de estudantes em salas de aula, tendo em vista que esta avaliação contém um teor de subjetividade que apresenta grandes desafios a quem planeja, projeta e executa as construções deste tipo de edificação.

Do ponto de vista da sustentabilidade do edifício, é obviamente desejável atingir elevados níveis de aceitabilidade térmica com o mínimo de energia. É com base neste cenário que as discussões acerca das possibilidades de redução do consumo de energia através de ventilação natural como estratégia passiva para a climatização de ambientes vêm se tornando cada vez mais frequentes. O aumento da velocidade do ar e a variação das posições de suprimento de ar na zona ocupada são métodos possíveis para se obter um *design* ideal de distribuição de ar (FONG *et al.*, 2015).

Apesar de muitas vezes as condições climáticas serem favoráveis para alcançar o conforto térmico em edificações apenas com ventilação natural, o número de edifícios que recorrem ao resfriamento mecânico, por exemplo aos condicionadores de ar, como principal estratégia de climatização tem aumentado consideravelmente. No entanto, isso causa problemas devido ao elevado consumo de energia, além de poder proporcionar uma má qualidade do ar interior, que no caso de ambientes de ensino pode ser gravemente prejudicial. Em contrapartida, o uso de ventiladores pode gerar um efeito significativo no resfriamento interno com um consumo inferior de energia e com melhores taxas de renovação de ar (CÂNDIDO, 2010; ZHU *et al.*, 2013).

Com base no exposto, este trabalho tem como foco a análise do conforto térmico de estudantes universitários em salas de aula que atendam a um determinado padrão, como as salas existentes no *campus* da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos) em São Leopoldo-RS. Devido a universidade estar numa zona climática que apresenta verões quentes e por vezes úmidos, é de interesse deste estudo verificar as condições de conforto térmico dos alunos principalmente durante a estação mais quente do ano, já que o incremento de velocidade e das taxas de renovação de ar podem ser boas alternativas aos usuários de edificações em cidades com este tipo de clima. Pesquisas acerca do tema tratado e em condições climáticas semelhantes vêm sendo realizadas nos últimos anos (CÂNDIDO; DE DEAR; LAMBERTS, 2011; DE VECCHI, 2011; MISHRA; RAMGOPAL, 2015; YANG; ZHANG, 2009; ZHANG *et al.*, 2015; ZHU *et al.*, 2013).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é analisar a influência da renovação de ar no conforto térmico de estudantes universitários.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar as condições ambientais e a percepção dos alunos quanto ao conforto térmico em salas de aula;
- Comparar resultados de medições de campo e de pesquisas subjetivas em salas de aula com ventilação natural e uma sala com sistema de ventilação mecânica;
- Determinar o efeito da ventilação mecânica na avaliação do conforto térmico da sala proposta, levando em consideração a taxa de renovação de ar.

1.2 Justificativa

O exponencial aumento na aquisição e utilização do condicionamento artificial resulta no que De Vecchi (2015) chama de efeito cascata, onde as altas temperaturas provocadas pelas ondas de calor demandam uma maior utilização do condicionamento artificial, que contribui com a emissão de gases de efeito estufa e gera maior necessidade de investimentos

na infraestrutura do setor elétrico. De acordo com Gonçalves (2016), o volume de energia desperdiçado no uso e operação de edifícios, mais especificamente, no aquecimento, resfriamento e iluminação artificial de espaços internos poderia ser reduzido por medidas simples, como, por exemplo, a elevação (no caso do resfriamento) ou diminuição (no caso do aquecimento) das temperaturas de operação dos sistemas de condicionamento de ar.

Diante dos fatos, ao propor a análise de um sistema que possa propiciar condições de conforto térmico por meio do aumento das taxas de renovação de ar como uma alternativa de racionalização do uso de sistemas de condicionamento artificial, reduzindo assim o consumo de energia elétrica, este estudo também se alinha à questão da otimização de sistemas de energia, uma vez que a utilização racional e eficiente da energia possui uma conjuntura cada vez mais crítica em nossa sociedade.

1.3 Estrutura da Pesquisa

Este trabalho está estruturado em quatro seções além desta introdução. A primeira apresenta a contextualização teórica sobre o conforto térmico, onde é realizada uma revisão da literatura e são apontados alguns tópicos e pesquisas inerentes ao tema proposto. Neste capítulo também é apresentada a normatização existente em relação ao conforto térmico e algumas discussões acerca de suas aplicações. A segunda seção trata dos procedimentos metodológicos do estudo, materiais, instalações, instrumentos e procedimentos operacionais adotados durante os experimentos. Nesta seção é apresentada também a forma como foram tratados os dados para as respectivas análises. Logo após, apresenta-se os resultados, onde são analisados todos os dados coletados no intuito de avaliar as condições de conforto térmico de estudantes universitários. Por último, são realizadas as considerações e conclusões finais obtidas para este trabalho e as sugestões de temas a serem desenvolvidos em trabalhos futuros.

2 O CONFORTO TÉRMICO

Antes de definir conforto térmico é importante compreender os diversos contextos em que este se insere, uma vez que a sociedade moderna é cada vez mais urbanizada e as pessoas passam a maior parte de seu tempo em residências, locais de trabalho e outras edificações.

De acordo com o dicionário Michaelis (2016), a palavra conforto tem como significado o ato ou efeito de confortar, bem-estar, comodidade material; cômodo, aconchego. De uma forma mais integrativa e de acordo com a Teoria do Conforto, Oliveira (2013) o apresenta como o estado imediato de fortalecimento do indivíduo por ter as necessidades de alívio, tranquilidade e transcendência satisfeitas nos contextos físico, psicoespiritual, social e ambiental.

Com estas definições torna-se mais clara a compreensão das perspectivas relacionadas ao conforto ambiental. Para Freitas e Azerêdo (2013), o conforto ambiental pode ser estudado a partir dos conceitos de conforto térmico, lumínico e acústico e sob aspectos psicológicos, inerentes a cada indivíduo. O conforto térmico é considerado o fator mais importante da qualidade ambiental interna de um prédio ou edifício, apesar de não ser o único fator responsável por tal condição.

A ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) define o conforto térmico como o estado de espírito que expressa satisfação com o ambiente térmico (ASHRAE 55, 2013). O conforto térmico ocorre quando a temperatura do corpo é mantida dentro de estreitos limites, quando a umidade da pele é baixa e o esforço fisiológico de regulação de temperatura é minimizado (ASHRAE, 2009).

De acordo com Frota e Schiffer (2003), a noção do conforto térmico é diretamente relacionada à necessidade de manutenção da temperatura interna do corpo em valores razoavelmente constantes, por volta de 37°C - fator essencial à saúde e ao bem-estar. Quando não é exigido um maior esforço para a troca de calor entre o corpo humano e o ambiente, o indivíduo tem a sensação de conforto térmico, conseqüentemente a capacidade de trabalho, por este ponto de vista, é máxima.

Por outro lado, se as condições térmicas ambientais causam a sensação de frio ou de calor, o nosso organismo está perdendo mais ou menos calor do que o necessário para a manutenção da temperatura interna. Nestas condições, a homeotermia passa a ser alcançada com um esforço adicional, o que representa uma sobrecarga ao organismo e ocasiona a queda de rendimento do indivíduo e em casos excepcionais até a perda total da capacidade ou mesmo um problema de saúde. Essas trocas de calor com o ambiente podem ser equacionadas

através do balanço térmico de uma pessoa, que é obtido quando a produção interna de calor pelo corpo é igual a perda de calor para o ambiente. Em um ambiente moderado, o sistema termorregulador do corpo tentará modificar automaticamente a temperatura da pele e a secreção de suor para manter o equilíbrio térmico (ISO 7730, 2005).

Nos estudos relacionados ao conforto térmico, duas abordagens diferentes e com determinações distintas quanto as condições de gerenciamento do microclima nas edificações são constatadas. A primeira é conhecida como modelo estático e representa uma linha analítica ou racional da avaliação das sensações térmicas humanas e considera o homem como um simples receptor passivo do ambiente térmico. Já o modelo adaptativo, como é conhecida a segunda abordagem, considera o homem como um agente ativo, que interage com o ambiente, se adaptando ao mesmo, em resposta às suas sensações e preferências térmicas (NICOL e HUMPHREYS, 2002).

2.1 Conforto térmico segundo o modelo estático

De acordo com Lamberts *et al.* (2016), nos anos 70 o dinamarquês Povl Ole Fanger derivou uma equação geral para o conforto térmico. O método de Fanger, que é o mais reputado para avaliação do conforto térmico, também conhecido como método estático, já que os estudos foram realizados no interior de um ambiente totalmente controlado, leva em consideração a combinação de algumas variáveis físicas do ambiente, são elas: a temperatura do ar, a temperatura radiante média, a umidade e a velocidade do ar. Além destas variáveis ambientais, a taxa metabólica e a vestimenta também são consideradas para mensurar a sensação de conforto térmico de uma pessoa. Através de seu trabalho experimental e das equações desenvolvidas, Fanger obteve o Voto Médio Predito - PMV (*predicted mean vote*), que consiste em um valor numérico que demonstra a sensibilidade humana ao frio e ao calor. A partir destes estudos, surgiu também o conceito de Porcentagem Prevista de Insatisfeitos - PPD (*predicted percentage of dissatisfied*). Suas equações e métodos ainda são mundialmente utilizados e serviram de base para a elaboração de importantes normas internacionais como a ISO 7730/1994 e a ANSI/ASHRAE 1992, ambas já atualizadas.

Atualmente a norma ISO 7730/2005 e a ASHRAE 55/2013 adotam as pesquisas de Fanger e determinam o PMV como um índice que prevê o valor médio dos votos de um grande grupo de pessoas numa escala sétima de sensação térmica, Tab. (2.1), com base no balanço de calor do corpo humano.

Tabela 2.1 - Escala de sensação térmica

+3	Muito quente
+2	Quente
+1	Levemente quente
0	Neutro
-1	Levemente frio
-2	Frio
-3	Muito frio

Fonte: adaptado de ISO 7730/2005

Para o cálculo do PMV, a norma ISO 7730/2005 apresenta quatro equações que devem ser utilizadas, Eq. (2.1), (2.2), (2.3) e (2.4).

$$PMV = [0,33\exp^{-0,036M} + 0,028]\{(M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3}[5733 - 6,99(M - W) - p_a] - 0,42[(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5}M(5867 - p_a) - 0,0014M(34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8}f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)\}$$

(2.1)

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028(M - W) - I_{cl}\{3,96 \cdot 10^{-8}f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)\}$$

(2.2)

$$h_c = 2,38|t_{cl} - t_a|^{0,25} \text{ para } 2,38|t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1\sqrt{v_{ar}}$$

$$h_c = 12,1\sqrt{v_{ar}} \text{ para } 2,38|t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12,1\sqrt{v_{ar}}$$

(2.3)

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

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

(2.4)

onde M é a taxa metabólica, W é o trabalho ou eficiência mecânica, I_{cl} é o isolamento térmico das roupas, f_{cl} é o fator de área superficial das roupas, t_a é a temperatura do ar, \bar{t}_r é a temperatura radiante média, v_{ar} é a velocidade relativa do ar, p_a é a pressão de vapor no ar, h_c

é o coeficiente de transferência de calor por convecção e t_{cl} é a temperatura superficial das roupas.

A norma também descreve, através da Eq. (2.5), como calcular o índice de pessoas termicamente insatisfeitas com o ambiente (PPD), que é a porcentagem de pessoas que gostaria que o ambiente estivesse mais quente ou menos quente (mais frio) e correlaciona, através da Fig. (2.1), os índices PMV e PPD.

$$PPD = 100 - 95\exp(-0,03353PMV^4 - 0,2179PMV^2) \quad (2.5)$$

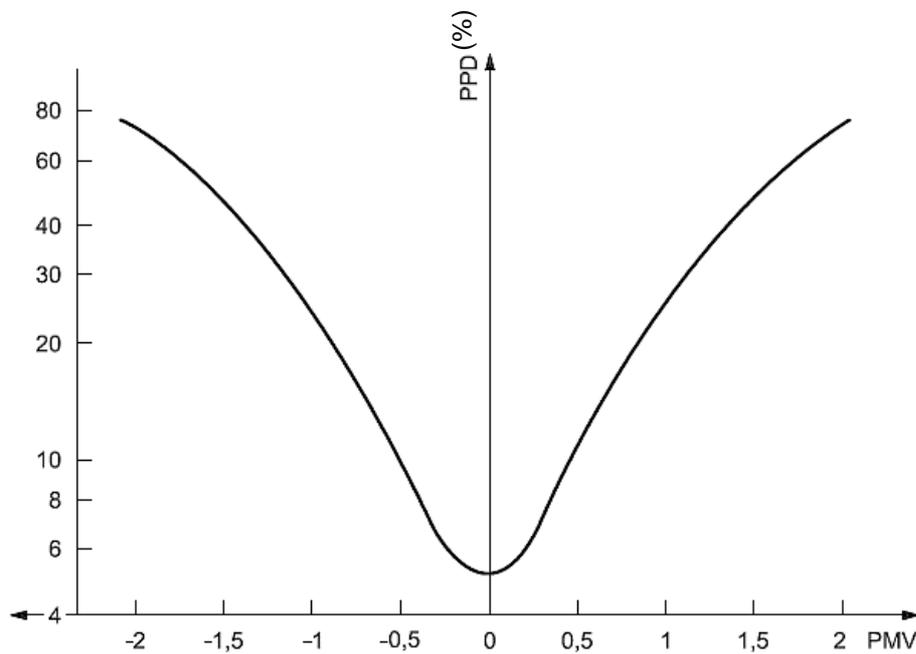


Figura 2.1 - PPD em função do PMV

Fonte: adaptado de ISO 7730/2005

Tanto a norma ISO 7730/2005 quanto a ASHRAE 55/2013 em seu método analítico de determinação de zona de conforto recomendam que em espaços termicamente moderados de ocupação humana, o índice PPD deve ser menor que 10%, o que corresponde a uma faixa do PMV de -0,5 a +0,5.

O uso do voto médio predito (PMV) como um modelo universal vem sendo amplamente discutido por pesquisadores que adotam as recomendações das referidas normas nas análises de estudos de campo. Pesquisas para avaliação do conforto térmico em ambientes termicamente condicionados que não sejam totalmente controlados ou ainda pesquisas em regiões mais quentes com ambientes desprovidos de condicionamento artificial, como os ventilados naturalmente, são as que apresentam mais desacordos com as premissas do método

PMV/PPD, onde o modelo geralmente superestima a real sensação térmica dos ocupantes do ambiente, ou seja, os ocupantes acabam tolerando uma faixa maior de temperaturas do que a prevista pelo método (DE DEAR; BRAGER, 2002; FONG *et al.*, 2015; MOUJALLE; CANTIN; GUARRACINO, 2008; SARBU; PACURAR, 2015; STEFANIZZI; NICO; LIUZZI, 2015; YATIM *et al.*, 2011).

Ainda que mundialmente utilizado, as aplicações do modelo de Fanger em espaços reais, onde existem flutuações de temperatura, como é o caso de ambientes ventilados naturalmente, e onde os ocupantes desenvolvem atividades rotineiras, iniciaram uma série de questionamentos, sendo que estas indagações culminaram na aceitação de um modelo fundamentalmente diferente, conhecido como modelo adaptativo (DE VECCHI, 2015).

2.2 Conforto térmico segundo o modelo adaptativo

De acordo com Nicol e Humphreys (2002), as pessoas têm a capacidade de se adaptar diferentemente ao ambiente quando habitam em diferentes localizações geográficas, funcionando como uma espécie de ajuste do corpo ao meio térmico local, sendo esta tendência natural utilizada na abordagem adaptativa ao conforto térmico.

A partir das pesquisas de Fanger, novos estudos relacionados ao conforto térmico foram sendo realizados e de acordo com Lamberts *et al.* (2016), Michael Humphreys propôs o modelo adaptativo em 1979, mencionando que não existe um valor constante de temperatura para o conforto, mas sim que este valor varia de acordo com a estação e com as temperaturas às quais as pessoas estão acostumadas. Lamberts *et al.* (2016) também mencionam que a abordagem adaptativa considera que fatores além dos físicos e psicológicos interagem na percepção térmica. Para os autores estes estudos têm como base os conceitos de aclimação, e os fatores considerados podem incluir características inerentes à demografia como gênero, idade e classe social, ainda ao contexto como a composição da edificação, estação e clima, e à cognição como as atitudes, preferências e expectativas.

A última versão da ISO 7730 (2005) apresenta recomendações de como levar em consideração a adaptação de pessoas ao se avaliar e projetar sistemas. Já a ASHRAE 55/2013 traz um método opcional para determinar as condições térmicas aceitáveis em espaços naturalmente ventilados. Este método traz algumas restrições, como por exemplo, a não utilização de qualquer sistema mecânico de resfriamento ou aquecimento no ambiente bem como os ocupantes poderem estar livres para adaptar suas roupas às condições térmicas interiores e/ou exteriores dentro de um intervalo de pelo menos 0,5 a 1,0 clo. Cabe salientar

que clo é a unidade usada para expressar o isolamento térmico de um item de roupa ou de uma combinação de itens, sendo que 1 clo equivale a 0,155 m² K/W. A Fig. (2.1) apresenta a faixa admissível de valores de temperatura operativa para ambientes naturalmente ventilados, de acordo com a ASHRAE 55/2013.

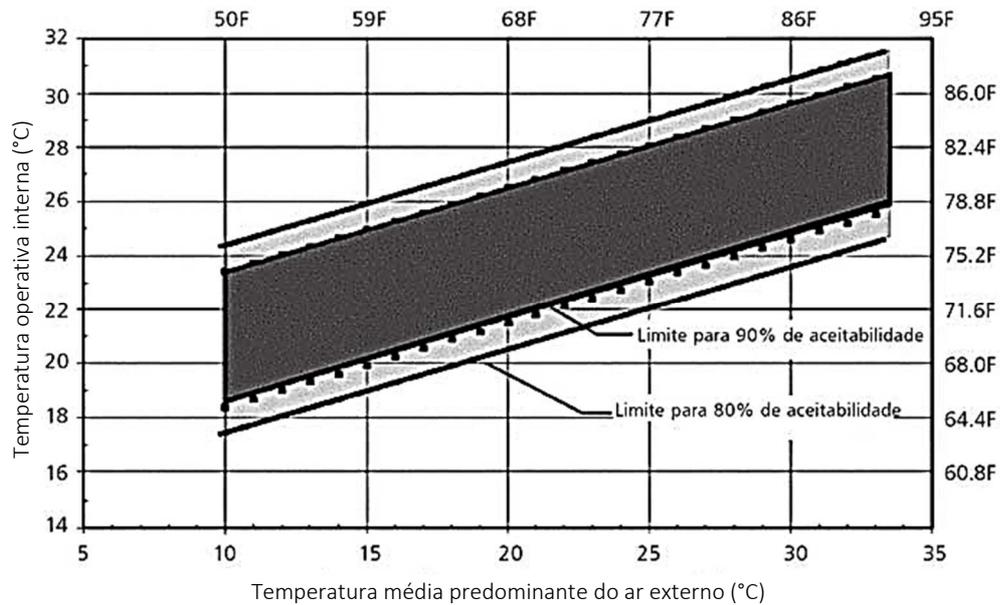


Figura 2.2 - Intervalos aceitáveis de temperatura operativa para ambientes naturalmente condicionados

Fonte: adaptado de ASHRAE 55/2013

Através da Fig. (2.1) pode-se observar que é possível obter, por exemplo, ambientes confortáveis com temperaturas operativas acima de 30 °C desde que a média predominante das temperaturas externas seja superior a 28 °C.

Com o advento do modelo adaptativo nas normas internacionais de conforto térmico, estratégias passivas como a ventilação natural passaram a ser viáveis em diferentes partes do mundo e como consequência desta mudança, a expansão dos limites da temperatura de conforto térmico resultou em iniciativas de racionamento energético em edificações condicionadas artificialmente por meio do ajuste na temperatura de *setpoint* (DE VECCHI, 2015). Para De Dear (2007), o conforto adaptativo tem um claro potencial para economia de energia, com uma estimativa que pode chegar até 10% de economia no consumo final de energia para cada grau de alargamento de zona de conforto.

Diversos estudos de campo apontam resultados que dão suporte as conclusões apresentadas pelo padrão do conforto adaptativo, isto é, os ocupantes de edifícios ventilados naturalmente sentem-se termicamente satisfeitos ou em conforto térmico em uma gama mais

ampla de temperaturas quando comparados aos ocupantes de um ambiente com condicionamento de ar (CÂNDIDO *et al.*, 2010; CÂNDIDO *et al.*, 2012; DE VECCHI, 2015; HONNEKERI *et al.* 2014; LIAN *et al.*, 2013; MISHRA; RAMGOPAL, 2015; SCHIAVON; MELIKOV, 2009; STEFANIZZI; NICO; LIUZZI, 2015; YANG; ZHANG, 2009).

As primeiras equações provenientes do modelo adaptativo tinham por objetivo definir uma temperatura que retratasse a condição de neutralidade térmica em função da temperatura externa. Na literatura são encontradas diversas equações, porém, algumas destas equações apresentam maior precisão em condições específicas. Uma questão importante por trás do processo de adaptação é o padrão de condições climáticas externas e a exposição a elas, sendo esta a principal entrada para os modelos de conforto adaptativo, que preveem prováveis temperaturas de conforto ou intervalos de temperatura de conforto a partir de valores médios mensais de temperaturas externas (ASHRAE, 2009).

A ASHRAE 55/2013 apresentou uma nova versão da equação para a predição da temperatura neutra em ambientes internos ventilados naturalmente, que utiliza como base um valor de temperatura média predominante do ar externo e determina limites mínimos e máximos de uma zona de aceitabilidade térmica. Por este método, a temperatura média predominante do ar externo pode ser calculada a partir de uma média aritmética dos valores médios diários da temperatura do ar externo, considerando não menos que sete dias e não mais que trinta dias sequenciais e anteriores ao dia em questão. A temperatura média diária do ar exterior para cada um dos dias sequenciais será a média aritmética simples de todas as observações de temperatura de bulbo seco ao ar livre durante as 24 horas do dia. A quantidade de medições não deve ser inferior a duas e nesse caso, será o valor mínimo e o máximo da temperatura no dia. Ao usar três ou mais medições, os períodos de tempo deverão ser uniformemente espaçados.

Entretanto, a temperatura predominante pode também ser calculada por meio de uma média ponderada exponencialmente de valores médios diários da temperatura do ar externo dos últimos dias, anteriores ao dia em questão, com um fator de ponderação que pode variar entre 0,6 e 0,9. Por este segundo método, não existe um limite superior de dias a ser considerado para o cálculo. A norma permite que sejam utilizados dados de temperatura média mensal publicados por estações meteorológicas locais quando os dados climáticos não estiverem disponíveis.

A Eq. (2.6) e a Eq. (2.7) apresentam, respectivamente, as equações referentes ao limite superior e ao limite inferior da zona de aceitabilidade térmica do modelo adaptativo empregado pela ASHRAE 55/2013.

Através do gráfico da Fig. (2.2) pode-se observar, por exemplo, que para baixos valores de velocidade média do ar (abaixo de 0,2 m/s), a norma prevê que uma vez observados os critérios de isolamento térmico das roupas e taxa metabólica, os usuários terão um índice PMV entre -0,5 e +0,5 para uma faixa de temperatura operativa que corresponde de pouco mais de 20 °C a 27 °C. Entretanto, ao aumentar a velocidade do ar para 0,8 m/s, o mesmo índice PMV é obtido para uma faixa de temperatura operativa entre 23 °C a pouco mais de 30 °C.

2.3 Conforto térmico nas instituições de ensino

Alguns estudos apontam que a produtividade e a qualidade do trabalho realizado por uma pessoa estão diretamente relacionadas com as condições do ambiente em que se desenvolvem as atividades e também que as condições térmicas adequadas podem influenciar positivamente nesta questão. Neste sentido, Coutinho Filho *et al.* (2007) mencionam que uma vez que exista esta relação direta da qualidade e da produtividade com o ambiente de trabalho pode-se afirmar que as salas de aula também precisam fornecer aos alunos e professores condições saudáveis, no intuito de garantir a espontaneidade de umas das atividades mais importantes para a sociedade.

Assim como ocorre em ambientes de trabalho como indústria, comércio e serviços, professores e alguns alunos passam o maior período do dia em salas de aula e espaços de estudo. Os alunos passam muito tempo ouvindo e compreendendo lições, situação na qual os mesmos permanecem em suas mesas, o que de certa forma limita a liberdade dos estudantes em poder modificar ou ajustar o seu nível de atividade de acordo com o ambiente térmico, durante o período de aula. Além disso, muitas vezes a possibilidade de abrir ou fechar janelas ou mesmo de alterar parâmetros de funcionamento de sistemas de ventilação ou condicionamento de ar é restrita (CORGNATI; FILIPPI; VIAZZO, 2007). Para Yatim *et al.* (2011), proporcionar um ambiente escolar confortável é essencial, pois pode afetar o ensino e a aprendizagem.

Nos últimos anos, diversos estudos científicos analisaram os aspectos relacionados ao conforto térmico e/ou a qualidade do ar interno em instituições de ensino (CÂNDIDO *et al.* 2010; ELBAYOUMI *et al.*, 2014; FONG *et al.*, 2011; LOOMANS *et al.*, 2011; MISHRA; RAMGOPAL, 2014; MISHRA; RAMGOPAL, 2015; MODESTE; TCHINDA; RICCIARDI, 2014; WARGOCKI; WYON, 2007). Algumas pesquisas inclusive avaliaram a influência do ambiente térmico no desempenho escolar de alunos, como por exemplo o estudo realizado por

Clementes-Croome *et al.* (2012), onde através de intervenções realizadas em salas de aula para melhorar a taxa de ventilação e manter a temperatura dentro de uma faixa aceitável, os autores obtiveram, através de tarefas de desempenho destinadas a mais de 200 alunos, resultados significativamente mais rápidos e respostas mais precisas para testes de reação de escolha (2,2%), vigilância de cores (2,7%), memória de imagem (8%) e reconhecimento de palavras (15%) para as taxas de ventilação mais elevadas em comparação com as condições de pouca ventilação.

2.3.1 Um panorama sobre os estudos relacionados ao conforto térmico em instituições de ensino

No intuito de ampliar o conhecimento referente à temática conforto térmico em instituições de ensino, em janeiro de 2016 realizou-se uma pesquisa bibliométrica em duas importantes bases de dados científicas, a *Web of Science* (WOS), do *Institute for Scientific Information* e a *Scopus* da Elsevier. Através deste estudo foi possível verificar que o tema conforto térmico em instituições de ensino está em evolução, já que em ambas as bases de dados pesquisadas notou-se que o número de publicações aumentou consideravelmente nos últimos dez anos, conforme Fig. (2.1) e (2.2).

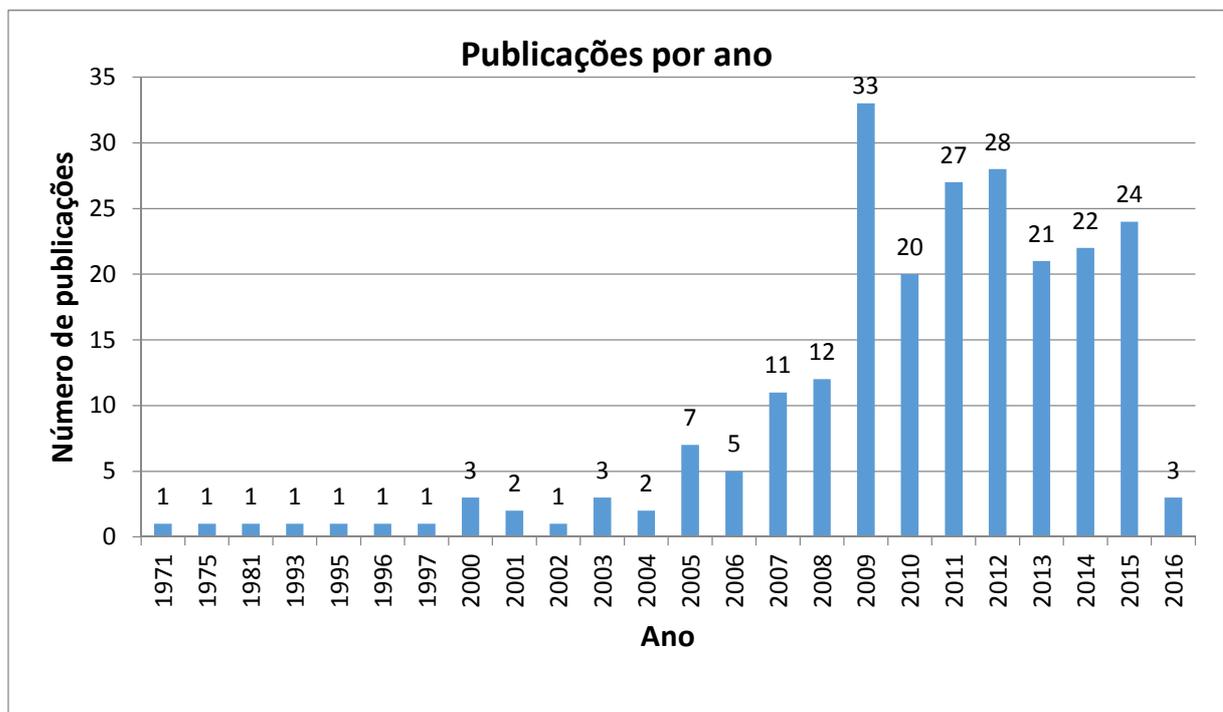


Figura 2.4 - Publicações por ano na base Scopus

Fonte: Adaptado da base de dados Scopus (2016)

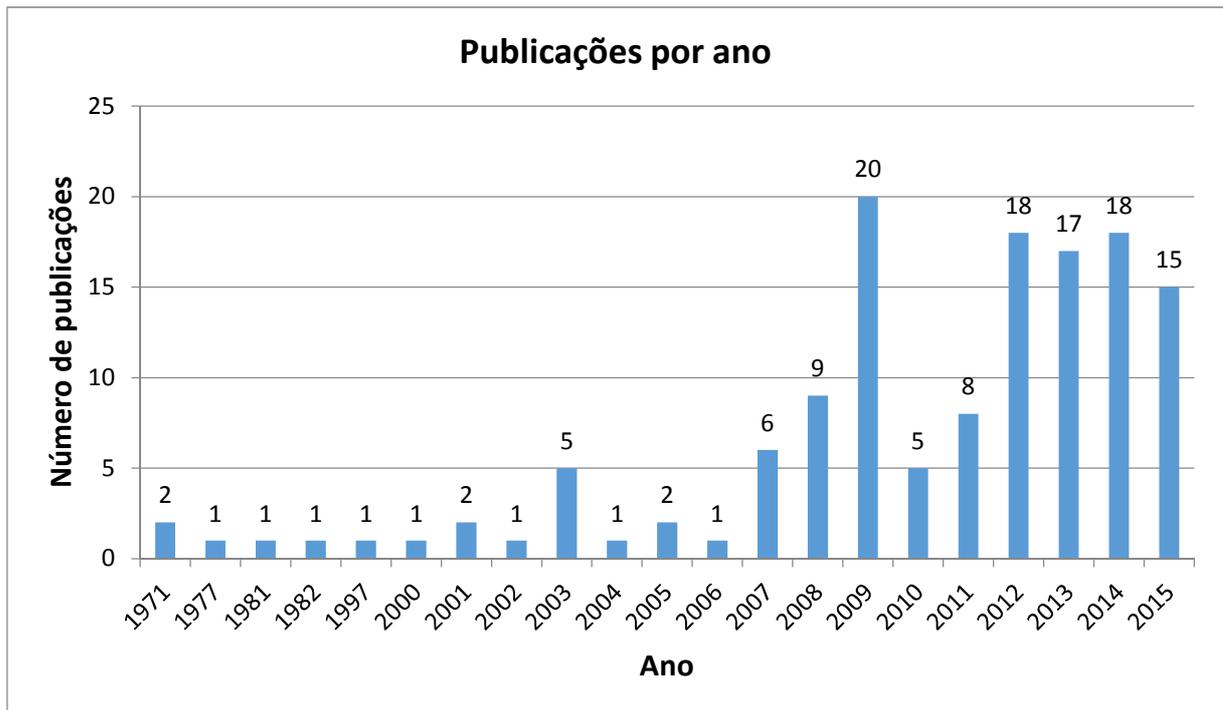


Figura 2.5 - Publicações por ano na base WOS

Fonte: Adaptado da base de dados WOS (2016)

As publicações encontradas durante a pesquisa são em sua maioria artigos científicos e a maior parte está relacionada a área de Engenharia. Entre os periódicos com maior número de publicações destacam-se o *Building and Environment*, o *Energy and Buildings* e o *Indoor and Built Environment*. Entre as instituições que mais publicaram trabalhos relacionados ao tema pesquisado destacam-se a Universidade do Algarve e a *University of Sidney*.

No ranking dos países que mais publicaram sobre a temática a China lidera nas duas bases. Na base Scopus, os Estados Unidos é o segundo país que mais publica, seguido por Portugal, Reino Unido e Austrália. Na WOS, a Inglaterra é o segundo país que mais publica, seguido por Portugal, Itália e Estados Unidos. O Brasil ocupa a 12ª posição na base Scopus e a 10ª posição na base WOS.

Através de análise realizada entre as publicações com maior número de citações foi possível constatar uma estreita relação entre o tema pesquisado e os tópicos ventilação, qualidade do ar interior e conforto ambiental e de forma mais superficial, mas não menos importante, consumo de energia e eficiência energética. Uma hipótese para relação dos tópicos conforto térmico e ventilação é o grande número de escolas e instituições de ensino que não usufruem de um sistema de condicionamento de ar. Outra hipótese é a já comentada

crescente preocupação de países e governos com sistemas que possam ocasionar o aumento do consumo de energia e com isso prejudicar os padrões energéticos ou ir de encontro a programas de sustentabilidade ambiental e eficiência energética.

Nos estudos avaliados, a ventilação dos ambientes é alcançada naturalmente ou por meio de sistemas mecânicos. Lamberts *et al.* (2016), comentam que para obterem-se ambientes climatizados de maneira sustentável, é necessário incrementar o valor da velocidade do ar ao invés de reduzir a temperatura e a umidade relativa do ar, alcançando equivalentes níveis de conforto. O incremento da velocidade do ar pode ser uma solução bastante eficiente, desde que antes sejam analisadas todas as condicionantes de influência, de maneira que seus efeitos sejam exponenciados.

2.3.2 Ventilação e qualidade do ar interior nas instituições de ensino

Diversas pesquisas têm relacionado a ventilação e a qualidade do ar interno aos estudos de conforto térmico, uma vez que a falta de renovação do ar, por exemplo, impacta diretamente na qualidade do ar de ambientes internos e neste caso, pode interferir consideravelmente no rendimento e no bem-estar dos seus usuários. De acordo com estes estudos, o aumento nas taxas de ventilação pode melhorar o desempenho dos usuários e contribuir para o conforto térmico tanto em escritórios (MELIKOV, 2008; PASUT *et al.*, 2014; SCHIAVON; ZHANG *et al.*, 2015; SIMONE *et al.*, 2014; ZHU *et al.*, 2013), como em salas de aula (CONCEIÇÃO *et al.*, 2010; ELBAYOUMI *et al.*, 2014; FONG *et al.*, 2015; MODESTE; TCHINDA; RICCIARDI, 2014; SHENDELL, *et al.*, 2004).

Para Clements-Croome *et al.* (2012), o estudo realizado em oito escolas primárias na Inglaterra forneceu fortes evidências de que baixas taxas de ventilação nas salas de aula reduzem significativamente a atenção e a vigilância dos alunos e afetam negativamente a memória e a concentração. O ambiente físico, portanto, afeta o ensino e a aprendizagem.

Em muitos países já há uma crescente preocupação sobre a qualidade do ar nas escolas, já que poluentes atmosféricos produzidos por fontes externas e internas afetam o meio ambiente e a nossa saúde. A concentração de muitos poluentes do ar interior está correlacionada com a concentração de CO₂ quando os ocupantes do edifício estão presentes (YANG *et al.*, 2016). Jurado, Bankoff e Sanchez (2014) comentam que a qualidade do ar nas salas de aula é de especial preocupação para os estudantes, particularmente àqueles mais sensíveis a má qualidade do ar. Uma das características mais dominantes de uma sala de aula é sua alta densidade de ocupação, o que resulta em elevados valores das fontes de calor

internas (cargas térmicas internas), bem como das emissões internas de odores corporais, vapor de água e CO₂, causando uma preocupação crescente em relação à qualidade do ar interior onde jovens, por exemplo, são expostos ao longo de grande parte do período de seus anos de crescimento (BECKER; GOLDBERGER; PACIUK, 2007).

Neste sentido, o uso do controle pessoal sobre o ambiente parece ter um papel fundamental na satisfação dos ocupantes em relação a qualidade do ar e também ao conforto térmico. Um usuário que participa do controle ambiental de uma edificação, considerando edificações mistas, por exemplo, o faz por meio da abertura de janelas, manutenção dos elementos de sombreamento, liga ou desliga os sistemas de refrigeração, aquecimento e iluminação artificial. As razões dos ocupantes para abrir as janelas podem incluir o desejo de ar fresco ou de movimentos de ar, o que é tão importante para eles como o ajuste de temperatura (ACKERLY; BRAGER, 2013).

Simone *et al.* (2014) comentam que em seus estudos uma maior velocidade do ar e controle pessoal aumentaram a aceitabilidade do ambiente interno para altas temperaturas do ar. A capacidade de controlar um ambiente interior pode melhorar o nível de conforto térmico do sujeito e estender a escala de aceitação térmica. Quando o controle pessoal do usuário é disponibilizado, o usuário precisa de uma menor velocidade de ar para obter um maior nível de conforto. Portanto, o controle básico da temperatura interna em combinação com o controle local da velocidade do ar é uma maneira eficiente de manter o ambiente interior agradável (ZHU *et al.*, 2013).

A sigla PEC (*Personal Environmental Control*) refere-se ao controle ambiental pessoal das condições térmicas e de qualidade do ar que circundam diretamente o ocupante. O PEC inclui uma subcategoria chamada ventilação pessoal (PV - *Personal Ventilation*), que aparentemente implica na entrega de ar exterior para uma pessoa. Zhang, Arens e Zhai (2015) comentam, porém, que o PEC em si não envolve necessariamente a ventilação de ar exterior, porque ele pode ao invés disso, usar o ar ambiente para controlar ou melhorar as condições térmicas locais da pessoa e a qualidade do ar local. Os autores introduzem o termo Sistema de Conforto Pessoal (PCS - *Personal Comfort System*) e sugerem que dentro do conceito geral PEC, existem duas subcategorias: PCS, que opera sem o fornecimento de ar exterior, e PV, que fornece ar exterior. Um ventilador de mesa ou um aquecedor radiante, por exemplo, seriam exemplos de um PCS. Os sistemas PV devem possuir um duto ou uma tubulação para uma fonte de ar exterior.

Zhang, Arens e Zhai (2015) apresentam alguns tipos de PCS, dentre os quais apresenta-se dois:

- Ventiladores de teto: estes fornecem uma corrente de ar vertical sob o ventilador, convertendo-se a um fluxo lateral fora do jato de ar. Uma grande variedade de ventiladores estão comercialmente disponíveis. Sua eficiência energética e qualidade acústica tem sido muito melhorada nos últimos anos devido às melhorias em seus motores e *design* das pás do ventilador;
- Fluxos laterais de ar de grande área (incluindo ventilação de janelas): ventiladores de grande porte produzem fluxo de ar em massa, normalmente vistos em configurações industriais, ginásios ou *lobby*. O fluxo de ar natural através de janelas ou desenhos abertos pode assemelhar-se a tais fluxos.

O grau de correção possível na temperatura ambiente, em direção a temperatura de neutralidade térmica, a partir de um PCS, permite uma substancial economia de energia como consequência de ajustes de *setpoint* e de redução da intensidade de sistemas de aquecimento, ventilação e condicionamento de ar (HVAC - *Heating, Ventilation and Air Conditioning*) no ambiente. Para um edifício, esta economia pode exceder 30% do total despendido em sistemas HVAC. Estudos de campo envolvendo PCS e que quantificam conforto e energia são essenciais para encorajar a adoção destes sistemas em edifícios (ZHANG, ARENS; ZHAI, 2015).

Em relação aos sistemas de ventilação é importante destacar os três métodos de distribuição de ar no ambiente que são amplamente utilizados em pesquisas que envolvem ventilação e a qualidade do ar interno ao tratar o tema conforto térmico.

A ventilação por mistura (MV - *Mixing Ventilation*) é um método tradicional de distribuição de ar para regular o ambiente interior, que fornece ar fresco ao nível do teto com alta velocidade para conseguir uma distribuição uniforme de temperatura e de poluentes em todo o espaço (SMEDJE; MATTSSON; WÄLINDER, 2011; YANG *et al.*, 2016). Em sistemas MV, o jato de alimentação libera o ar fora da zona ocupada a uma taxa de velocidade de ar elevada. O volume de ar entregue será completamente misturado com o ar ambiente antes de atingir a zona ocupada e a taxa cai para o nível desejado, dependendo da característica do ambiente. O fornecimento vertical, a partir do teto, é uma disposição comum para evitar quaisquer obstáculos para a distribuição de ar, tais como divisórias, que possam diminuir a eficiência de ventilação na zona ocupada. Como os terminais de alimentação de ar são montados no teto, o ventilador necessita de um consumo significativo de energia caso seja necessário um maior movimento de ar na zona ocupada, devido à distância entre os terminais e os ocupantes. Também é difícil para este sistema fornecer ar horizontalmente na zona ocupada (FONG *et al.*, 2015).

Outro método comum de distribuição de ar é a ventilação por deslocamento (DV - *Displacement Ventilation*), na qual o ar para a zona de respiração é fornecido ao nível do chão, transportado pela camada limite ao redor do corpo do ocupante e extraído no nível do teto (FONG *et al.*, 2015; SMEDJE; MATTSSON; WÄLINDER, 2011). Comparado ao MV, o método de ventilação por deslocamento (DV) foi proposto para fornecer ar fresco perto do nível do chão, numa parede lateral, e retornar o ar esgotado perto do nível do teto através da força de flutuação, pois o ar fresco é aquecido por fontes de calor na sala. O método DV foi originalmente proposto para economizar energia e melhorar a qualidade do ar interior na zona de respiração (YANG *et al.*, 2016).

A ventilação por estrato (SV - *Stratum Ventilation*) é um terceiro método de ventilação, o qual pode compensar uma temperatura ambiente mais elevada através do fornecimento de ar horizontalmente por meio de difusores de ar montados na parede e ao nível da cabeça, ou seja, ao nível da zona de respiração (FONG *et al.*, 2015). Em climas quentes, a ventilação por estrato pode manter o conforto térmico devido a sua característica de diferença de temperatura de ar vertical inversa entre os níveis da cabeça e do tornozelo e melhor qualidade do ar na zona de respiração (LIN; CHOW; TSANG, 2005; LIN *et al.*, 2009).

2.4 Normas de conforto térmico e qualidade do ar interno no Brasil

No Brasil, duas normas discorrem sobre alguns parâmetros de conforto térmico, apesar de não serem normas específicas para avaliação de conforto térmico. São elas: NR 17 (Ergonomia) e a parte 2 da ABNT NBR 16401 (2008), que apresenta os parâmetros de conforto térmico em ambientes climatizados artificialmente.

A NR 17, publicada em 1990, apresenta superficialmente as condições térmicas aceitáveis para ambientes de trabalho internos, definindo limites de temperatura efetiva entre 20 e 23 °C, com velocidade do ar não superior a 0,75 m/s e umidade relativa do ar acima de 40%. Já a ABNT NBR 16401-2, publicada em 2008, é mais detalhada, e tem como base o *ASHRAE Handbook Fundamentals* de 2005. O documento define condições internas de conforto térmico para o verão, com a temperatura operativa variando de 22,5 a 25,5 °C com 65% de umidade relativa do ar e 23 a 26 °C quando a umidade relativa é de 35%. Tais valores têm como base um clo de 0,5 e velocidade do ar inferior a 0,2 m/s para sistemas normais de distribuição do ar, e inferior a 0,25 m/s para a ventilação de deslocamento. No inverno, a temperatura operativa pode variar entre 21 e 23,5 °C com umidade de 60% e 21,5 a 24 °C

com umidade em 30%. Tais valores têm como base um clo de 0,9 e velocidade do ar inferior a 0,15 m/s para sistemas normais de distribuição do ar, e abaixo de 0,2 m/s para ventilação de deslocamento.

Nenhuma das normas mencionam o modelo adaptativo e, além disso, limitam as condições de conforto térmico para ambientes comerciais, que operam em uma faixa muito restrita de temperatura e velocidade do ar. Cabe ressaltar que Lamberts *et al.* (2016) elaboraram uma proposta para uma nova norma brasileira de conforto térmico, elaborada a partir do texto proposto pela ASHRAE 55, na revisão de 2010. Segundo os autores, este documento já foi editado e incorporado à parte 2 da ABNT NBR 16401 (2008) e atualmente aguarda a abertura para consulta pública e posterior publicação. Nesta nova versão, além do método que segue a fundamentação teórica de Fanger (1970) e do ASHRAE *Handbook Fundamentals* (2005), foram incorporados o novo método proposto pela ASHRAE 55/2013 para ambientes condicionados e com valores mais altos de velocidade do ar, além do método adaptativo para avaliação em espaços ventilados naturalmente.

Em relação a qualidade do ar interior, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) por meio da resolução-RE nº 9, de 16 de janeiro de 2003, apresenta os padrões referenciais de qualidade do ar interior em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo no Brasil. A resolução 9 menciona que os valores recomendáveis para os parâmetros físicos de temperatura, umidade, velocidade e taxa de renovação do ar e de grau de pureza do ar deverão estar de acordo com a NBR 6401, porém, esta norma está cancelada e foi substituída pela ABNT NBR 16401, de 2008.

A ABNT NBR 16401-3 especifica os parâmetros básicos e os requisitos mínimos para sistemas de ar condicionado, visando a obtenção de qualidade aceitável de ar interior para conforto, definindo vazões mínimas de ar exterior para ventilação, níveis mínimos de filtragem do ar e os requisitos técnicos dos sistemas e componentes relativos a qualidade do ar interior. O item 5 desta norma estipula a vazão mínima de ar exterior, de qualidade aceitável, a ser suprida pelo sistema para promover a renovação de ar interior e manter a concentração dos poluentes no ar em nível aceitável. Para salas de aula o valor mínimo de vazão de ar exterior estipulado é de 5 L/s por pessoa, sendo 7,5 L/s por pessoa (27 m³/h por pessoa) o valor considerado ideal, já que estudos relatam a existência de redução de reclamações e manifestações alérgicas em ambientes com este valor.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização desta pesquisa foi utilizado o modelo exploratório, uma vez que esta metodologia emprega a análise de dados primários e secundários. De acordo com Malhotra (2012), o objetivo da pesquisa exploratória é investigar ou fazer uma busca em um problema ou em uma situação para prover critérios e maior compreensão do assunto.

Quanto ao levantamento, foram utilizados dados primários e secundários. Conforme Malhotra (2012), dados primários são dados originados com a finalidade específica de solucionar o problema de pesquisa e dados secundários são dados coletados para fins diferentes, porém, oferecem várias vantagens em relação aos dados primários: são de fácil acesso, relativamente pouco dispendiosos e de obtenção rápida. Mas é importante examinar a experiência, credibilidade, reputação e integridade da fonte.

Desta forma, para alcançar os objetivos propostos, esta pesquisa foi desenvolvida em quatro etapas. A primeira etapa consiste de uma revisão bibliográfica que teve por objetivo ampliar o conhecimento e diagnosticar o panorama das publicações relacionadas ao tema abordado. Esta etapa também tencionou justificar a pesquisa e fundamentar o método proposto para o trabalho.

Na segunda etapa foram realizadas medições no intuito de caracterizar os parâmetros do sistema de ventilação mecânica instalado na sala C08108, para que a partir destes dados fossem realizadas as análises das taxas de renovação de ar na sala proposta.

A terceira etapa consistiu de medições ambientais realizadas concomitantemente a pesquisas subjetivas nas salas de aula propostas, no intuito de coletar os dados e os índices necessários. As medições das grandezas físicas para obtenção dos parâmetros indispensáveis aos cálculos dos índices de conforto térmico foram realizadas em salas de aula localizadas no *campus* da Unisinos e os dados subjetivos foram coletados a partir de um questionário que foi entregue aos estudantes, ocupantes destes ambientes, participantes da pesquisa.

Por fim, na última etapa foi realizada uma análise de todos os dados coletados no intuito de avaliar as condições de conforto térmico de estudantes universitários, com ênfase na estação mais quente do ano, comparando os resultados das medições de campo com os resultados das pesquisas subjetivas e averiguando a viabilidade de utilização do sistema de ventilação mecânica proposto levando em consideração a taxa de renovação de ar.

3.1 Ambientes de medição

Para a realização das medições e pesquisas subjetivas foram utilizadas as salas C05105, C05106, C06102, C06104, C06108, C06109, C06111, C06112, C07107, C07108, C07110, C08108 e C08109. A Fig. (3.1) apresenta uma das salas que foram utilizadas nesta pesquisa e a Fig. (3.2) apresenta, em contorno amarelo, a localização e posição dos prédios onde encontram-se as respectivas salas.



Figura 3.1 - Imagens da sala C06108



Figura 3.2 - Localização dos prédios no *campus* da Unisinos
Fonte: Adaptado do Google Earth

A escolha destas salas tem como base o fato destes ambientes apresentarem um determinado padrão de dimensões, construção e leiaute que permitiu comparações entre as próprias salas, entre as demais salas de aula da própria instituição, bem como de outras instituições de ensino que possuam ambientes e espaços semelhantes para a realização das atividades escolares regulares, como aulas teóricas. O *campus* universitário da Unisinos em São Leopoldo tem a disposição dos prédios praticamente no sentido norte-sul. A edificação típica que foi utilizada nesta pesquisa tem acabamento em tijolo a vista e alvenaria rebocada, piso em parquet e laje rebocada. O pé direito tem 300 cm de altura. Possui janelas em metalon com vidros de 4 mm. As esquadrias voltadas ao sul têm 180 cm de altura, com peitoril de 90 cm e na parede voltada para o norte janelas altas, com 60 cm e peitoril de 210 cm. A divisão entre as salas (leste-oeste) é de alvenaria rebocada e a cobertura é de telha de fibrocimento tipo calhetão.

A sala C06108, por exemplo, tem 75,45 m² e pode ser ocupada por até 50 alunos e um professor. A sala está equipada com 1 projetor multimídia e 1 computador desktop destinado ao uso do professor. A iluminação da sala de aula é realizada por 18 luminárias 2x32 W e o ambiente dispõe atualmente de um sistema de ventilação através de dois ventiladores de teto. A Fig. (3.3) apresenta uma planta baixa da sala exemplificada.

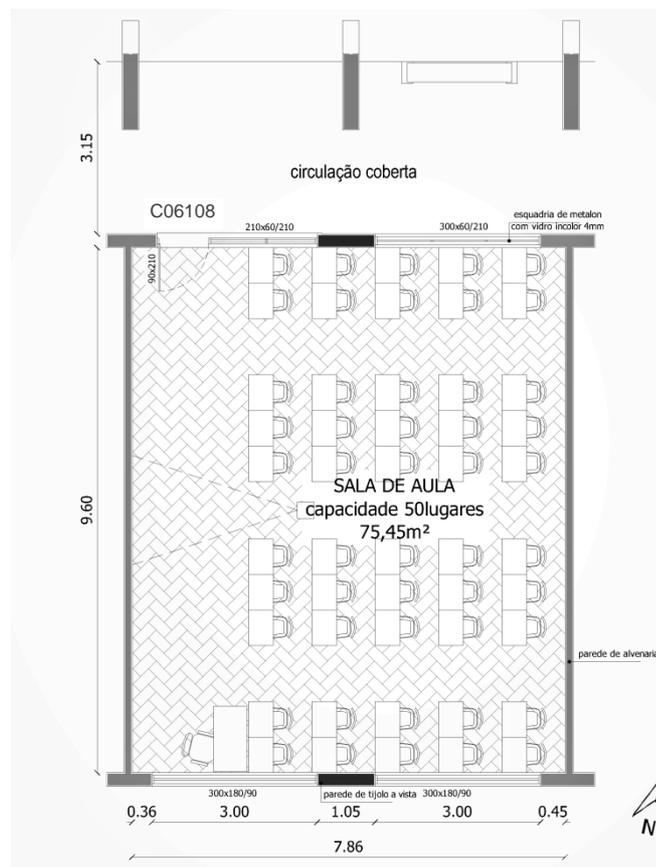


Figura 3.3 - Planta baixa da sala C06108

Em uma das salas (C08108) que foram adotadas como edificação típica, foi realizada a instalação de dois ventiladores helicocentrífugos *inline*, da marca Soler&Palau. Estes ventiladores são da série TD-*Silent*, uma linha especialmente desenvolvida e indicada para locais onde é necessário um baixo nível de ruído, já que apresentam uma considerável redução do nível sonoro devido aos elementos acústicos utilizados em sua construção como o isolamento interior fono-absorvente de fibra de vidro e a carcaça exterior tipo sanduíche. A Fig. (3.4), apresenta o modelo de ambos os ventiladores instalados para esta pesquisa. O modelo utilizado, conforme dados do fabricante, tem vazão nominal máxima de 1995 m³/h, potência absorvida máxima de 300 W e é projetado para dutos de 315 mm de diâmetro.



Figura 3.4 - Ventilador Helicocentrífugo modelo TD 2000/315 SILENT
Fonte: Soler&Palau

Antes da instalação na sala C08108 foi analisado o melhor posicionamento para os equipamentos, observando critérios como a orientação da sala, leiaute das classes, velocidade do ar e ruído dos ventiladores. Desta forma, os ventiladores foram instalados na parede norte (parede do corredor) e posicionados no centro das janelas que ficam na parte superior. A Fig. (3.5) apresenta originalmente a parede voltada para o norte, em destaque as janelas, bem como o corredor de circulação de uma das edificações típicas.



Figura 3.5 - Parede norte e corredor da edificação típica

Como originalmente os ventiladores *inline* são projetados para serem conectados em tubulações, foram construídas duas transições de retângulo para redondo (coifas) de forma que os ventiladores pudessem ser instalados junto as janelas, no vão central, uma vez que para tal condição foram retirados os vidros lisos do centro de cada janela para poder realizar a adaptação. As transições foram fabricadas em chapa de galvalume (liga de alumínio-zinco) com espessura de 0,5 mm. Também foram construídos dois suportes, por meio de cantoneiras e barras chatas de 6,4 mm de espessura, para que os ventiladores pudessem ser devidamente posicionados e alinhados junto às transições, que por sua vez foram fixadas à janela (metalon) através de fixadores mecânicos (rebites). Os suportes foram fixados, por meio de parafusos, à janela pela parte inferior e na parede de alvenaria pela parte superior. A Fig. (3.6) apresenta os dois ventiladores montados junto as janelas na sala C08108.



Figura 3.6 - Ventiladores montados na sala C08108

O objetivo da instalação destes ventiladores helicocentrífugos foi auxiliar no processo de renovação de ar interno através de trocas de ar com o ambiente externo e com isso baixar a temperatura do ar no interior da sala em dias onde a temperatura média seja elevada, porém, o valor de temperatura do ar externo esteja menor em relação ao do ar no interior da sala. Nesta perspectiva, os ventiladores foram posicionados de forma que durante o funcionamento realizassem a exaustão do ar do interior da sala, assim, ao se manter as janelas voltadas ao sul abertas, o ar externo (fresco) entraria pelo lado sul, percorreria a sala e seria exaurido pelo lado norte. É importante lembrar que as janelas da parede sul são voltadas para um ambiente arborizado e as janelas da parede norte são protegidas dos raios solares pelo telhado do corredor. Porém, como pôde ser observado na Fig. (3.2), não apenas o telhado do prédio C08, mas também dos demais prédios envolvidos nesta pesquisa, apresentam uma tonalidade escura devido a ação do tempo, fato que pode ter influência sobre a carga térmica proveniente da parte superior das salas. A Fig. (3.7) apresenta esquematicamente alguns exemplos típicos de cargas térmicas presentes no ambiente e o método de distribuição do ar proposto na sala C08108.

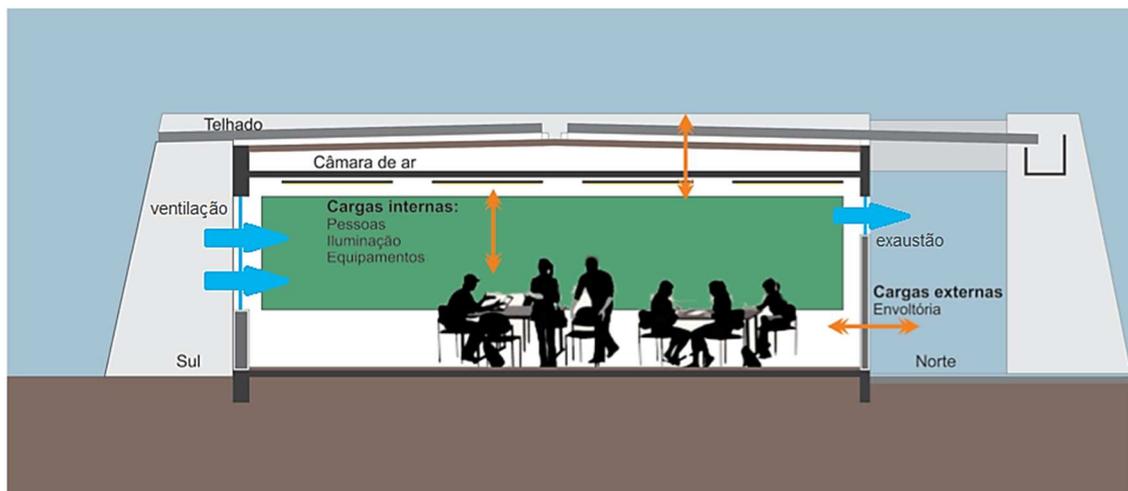


Figura 3.7 - Cargas térmicas e método de distribuição do ar na sala C08108

Desta forma, obteve-se dois tipos de ambientes para avaliação, um constituído com um sistema de ventilação mecânica (sala C08108) e outro apenas de ventilação natural (demais salas deste estudo). Cabe ressaltar que, para fins de estudo nas salas de aula propostas, os ventiladores de teto não foram considerados como um sistema de ventilação mecânica, uma vez que os mesmos não executam trocas de ar com o ambiente externo para fins de renovação do ar interno. Salienta-se, porém, que os ventiladores de teto, por sua vez, recirculam o ar

interno, aumentando sua velocidade, e desta forma podem impactar no conforto térmico dos usuários do ambiente.

3.2 Instrumentos de medição

Para verificação dos parâmetros ambientais durante as medições em salas de aula foram utilizados os instrumentos conforme apresentado na Tab. (3.1).

Tabela 3.1 - Instrumentos para medição dos parâmetros ambientais

Parâmetro	Símbolo	Sensor	Resolução	Instrumento	Marca/Modelo
Temperatura do ar	t_a	Termômetro (sonda NTC)	0,1 °C	Termo-anemômetro	Kimo / VT 50
Umidade relativa do ar	U_r	Higrômetro	0,1%	Medidor multifuncional	Instrutemp / ITMP-600
Velocidade do ar	v_{ar}	Anemômetro	0,01 m/s	Termo-anemômetro	Kimo / VT 50
Temperatura radiante média	\bar{t}_r	Termômetro de globo	0,1 °C	Medidor de estresse térmico	Quest / Questemp°10

O valor da temperatura radiante média (\bar{t}_r) foi calculado a partir das medições de temperatura de globo (t_g), temperatura do ar (t_a) e velocidade do ar (v_{ar}). Com a combinação destas medidas pôde-se estimar o valor da temperatura radiante média através da Eq. (3.1) ou da Eq. (3.2) que têm como base o balanço das trocas térmicas entre o globo e o ambiente.

Para $h_1 > h_2$

$$\bar{t}_r = \left[(t_g + 273)^4 + 0,4 \cdot 10^8 |t_g - t_a|^{\frac{1}{4}} (t_g - t_a) \right]^{\frac{1}{4}} - 273 \quad (3.1)$$

Para $h_1 \leq h_2$

$$\bar{t}_r = \left[(t_g + 273)^4 + 2,5 \cdot 10^8 v_{ar}^{0,6} (t_g - t_a) \right]^{\frac{1}{4}} - 273 \quad (3.2)$$

Os coeficientes de convecção h_1 e h_2 foram calculados pela Eq. (3.3) e pela Eq. (3.4) respectivamente.

$$h_1 = 1,4 \left(\frac{t_g - t_a}{D} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.3)$$

$$h_2 = 6,3 \frac{v_{ar}^{0,6}}{D^{0,4}} \quad (3.4)$$

onde D é o diâmetro do globo.

De acordo com Batiz *et al.* (2009), diversos estudos que buscaram analisar a relação entre o aprendizado e o ambiente térmico, por exemplo, tiveram como base apenas a variável temperatura do ar, sendo menos frequente a utilização de todas as variáveis térmicas estabelecidas por Fanger em estudos científicos que avaliam o desempenho dos alunos. Então, é necessário verificar o quanto as demais variáveis ambientais influenciam no conforto térmico e a percepção destas variáveis para um determinado grupo de pessoas que compartilha um mesmo ambiente de estudos.

Durante a análise das variáveis ambientais nas salas de aula, utilizou-se uma média de temperatura operativa comum a todos os usuários no ambiente ou ainda uma média comum a todos os usuários em uma mesma zona. Os valores de temperatura operativa foram calculados a partir da Eq. (3.5).

$$t_o = At_a + (1 - A)\bar{t}_r \quad (3.5)$$

onde t_o é a temperatura operativa e A é uma constante selecionada em função da velocidade relativa do ar. Adota-se $A = 0,5$ para $v_{ar} < 0,2$ m/s; $A = 0,6$ para v_{ar} entre 0,2 e 0,6 m/s e $A = 0,7$ para v_{ar} entre 0,6 e 1,0 m/s.

Para as medições dos parâmetros relacionados aos ventiladores do sistema de ventilação mecânica foram utilizados os instrumentos conforme apresentado na Tab. (3.2).

Tabela 3.2 - Instrumentos para medição dos parâmetros dos ventiladores

Parâmetro	Símbolo	Sensor	Resolução	Instrumento	Marca/Modelo
Pressão de velocidade (dinâmica)	P_v	Manômetro	1 Pa	Manômetro digital	Dwyer / 475 Mark III
Nível de pressão sonora	L_{PA}	Decibelímetro	0,1 dB	Medidor multifuncional	Instrutemp / ITMP-600
Tensão elétrica	V	Voltímetro	0,1 V	Alicate Wattímetro	Minipa / ET-4090
Corrente elétrica	I	Amperímetro	0,01 A	Alicate Wattímetro	Minipa / ET-4090

Os instrumentos que foram utilizados estavam ou foram calibrados, segundo recomendações dos fabricantes, em estabelecimentos pertencentes a Rede Brasileira de

Calibração (RBC). As medições ambientais que foram realizadas, bem como os parâmetros dos instrumentos utilizados nestas verificações tiveram como base os critérios da ABNT NBR 16401-2, porém, como esta norma trata dos parâmetros de conforto térmico em ambientes com condicionamento de ar também foram consideradas as recomendações da ASHRAE 55/2013.

3.3 Pesquisas subjetivas nas salas de aula

Para poder realizar o cálculo do voto médio predito (PMV), foram necessárias as variáveis pessoais ou subjetivas dos indivíduos. Estas variáveis estão relacionadas com as vestimentas e com a taxa metabólica dos ocupantes e foram estimadas através de um questionário (apêndice A) que foi disponibilizado e respondido pelos alunos concomitantemente às medições ambientais que foram realizadas.

Para o cálculo do PMV foi utilizada a Eq. (2.1) que é apresentada na norma ISO 7730/2005 e na ASHRAE 55/2013, nesta última em forma de um programa de cálculo.

Além de identificar as variáveis subjetivas, o questionário teve como objetivo diagnosticar as condições de conforto térmico oferecidas pelas salas de aula, através de perguntas e respostas que refletiram a real percepção dos alunos em relação aos parâmetros climáticos internos, uma vez que o conforto térmico abrange diversos aspectos da percepção do usuário, sendo que cada um destes aspectos é avaliado de forma diferente e através de itens específicos.

Como tratou-se de uma pesquisa de aceitabilidade, as perguntas previram se os alunos consideravam as condições ambientais “aceitáveis” ou “inaceitáveis” e para a verificação da sensação térmica foi utilizada a escala sétima de votos Tab. (2.1), também apresentada em ambas as normas mencionadas anteriormente.

O questionário que foi elaborado e aplicado teve como base a ISO 10551/1995, a ASHRAE 55/2013 e algumas pesquisas e trabalhos relacionados ao tema como por exemplo os estudos de Lamberts *et al.* (2016).

A ISO 10551/1995 estabelece que as pesquisas pontuais ou instantâneas relacionadas ao ambiente térmico devem buscar uma amostra de tamanho significativo, com uma taxa de resposta de no mínimo 50%, buscando refletir todo o espaço ocupado do ambiente.

3.4 Procedimentos de medição

As medições para análise de conforto térmico foram realizadas no período compreendido entre agosto de 2016 e março de 2017, nos três turnos, porém, foram intensificadas durante o período compreendido entre dezembro de 2016 e março de 2017, no intuito de abranger uma condição climática de temperatura mais elevada, à qual os ocupantes das salas estavam submetidos. Uma vez que a cidade de São Leopoldo, com latitude de 29°45'37"S e longitude de 51°08'50", enquadra-se, conforme ABNT NBR 15220-3, na zona bioclimática 2, com verões quentes e invernos frios e chuvosos devido ao clima subtropical úmido, o diagnóstico em um cenário de temperatura e umidade relativa do ar elevados, por exemplo, torna-se importante pois tratam-se de parâmetros ambientais que afetam diretamente o conforto térmico.

3.4.1 Medição dos parâmetros dos ventiladores do sistema de ventilação mecânica

Com o intuito de auxiliar no alcance dos objetivos propostos nesta pesquisa, foram realizadas medições que tiveram por finalidade averiguar alguns parâmetros de funcionamento do sistema de ventilação mecânica instalado na sala C08108.

Para determinar o valor de vazão dos ventiladores foram realizadas algumas medições e cálculos que tiveram como base a norma AMCA 210-ASHARE 51/1999 no que se refere a taxas de fluxo de ar de ventiladores em condições de teste. Neste sentido, a Eq. (3.6) corresponde a pressão de velocidade (pressão dinâmica) obtida através de medições individuais por pontos transversais em um duto redondo.

$$P_v = \left(\frac{\sum \sqrt{P_{vr}}}{n} \right)^2 \quad (3.6)$$

onde P_v é a pressão de velocidade ou pressão dinâmica, P_{vr} é a pressão de velocidade medida em um ponto transversal no duto, e n é o número de medições realizadas.

Desta forma, com auxílio de um tubo de Pitot, que enviava os sinais de pressão até um manômetro digital, foram realizadas algumas medições para determinar a pressão dinâmica de ambos os ventiladores instalados na sala C08108, conforme Fig. (3.8). Cabe lembrar que as medições foram realizadas para as duas configurações de velocidade disponíveis nos ventiladores (VR - Velocidade Rápida e VL - Velocidade Lenta).



Figura 3.8 - Medição de pressão dinâmica do ventilador

De posse dos valores de pressão dinâmica dos ventiladores (dutos) e dos valores de temperatura do ar, umidade relativa e pressão atmosférica (barométrica), verificados no instante das medições, foi possível calcular o valor da velocidade média do ar no duto, Eq. (3.7), e conseqüentemente, conhecendo a área da seção transversal do duto, foi possível calcular o valor de vazão nos ventiladores, através da Eq. (3.8). Cabe salientar que o valor de pressão atmosférica foi obtido através do histórico de dados registrados pela mini estação meteorológica da Unisinos.

$$V_{med\ ar} = \sqrt{\frac{2P_v}{\rho}} \quad (3.7)$$

onde $V_{med\ ar}$ é a velocidade média do ar no duto e ρ é a massa específica do ar no plano transversal do duto.

$$\dot{V} = V_{med\ ar} A \quad (3.8)$$

onde \dot{V} é a vazão no plano transversal de Pitot e A é a área da seção transversal do duto.

Outro parâmetro averiguado no sistema de ventilação foi o nível de pressão sonora, em decibéis, ao qual os usuários da sala C08108 estariam submetidos quando o sistema estivesse em funcionamento. Para isso, foram consideradas sete zonas na sala, sendo seis de ocupação dos alunos e uma de ocupação do professor e através de um decibelímetro posicionado a 1,1 m e a 1,7 m, foram verificados os níveis de pressão sonora em três situações: sistema de ventilação desligado; sistema de ventilação ligado com os ventiladores em VR e sistema de ventilação ligado com os ventiladores em VL. A Fig. (3.9) apresenta a medição do nível de

pressão sonora sendo realizada em uma das zonas atribuídas. As alturas mencionadas correspondem aproximadamente a altura dos ouvidos dos usuários sentados e de pé, respectivamente.



Figura 3.9 - Medição do nível de pressão sonora na sala C08108

Para fins de comparação também foi verificado o nível de pressão sonora, em decibéis, ao qual os usuários da sala C08108 estão submetidos quando os ventiladores de teto estão em funcionamento. Neste caso a análise foi realizada em duas situações: ventiladores de teto desligados e ventiladores de teto ligados. Convém salientar que os dois ventiladores de teto possuem um comando simples, cada um, que aciona os mesmos em apenas uma velocidade.

O último parâmetro averiguado foi em relação a potência elétrica dos ventiladores, que foi calculada conforme a Eq. (3.9).

$$\dot{W}_{elctr} = VI \quad (3.9)$$

onde \dot{W}_{elctr} é a potência elétrica, V é a diferença de potencial e I é a corrente elétrica.

Assim, com os ventiladores em funcionamento, foram verificados os valores da diferença de potencial elétrico (tensão elétrica) e da corrente elétrica na entrada de alimentação do motor de cada ventilador. Assim como ocorrera nas medições de pressão dinâmica, as medições de tensão e corrente elétricas foram realizadas para as duas configurações de velocidade disponíveis nos ventiladores (VR - Velocidade Rápida e VL - Velocidade Lenta).

De posse dos valores de tensão e corrente elétrica, foi calculada a potência elétrica de cada ventilador através da Eq. (3.9). Convém mencionar que um dos ventiladores tem como tensão nominal de funcionamento o valor de 127 V, de forma que foi necessário a implantação de um transformador monofásico (220/120 V - 500 VA) ao circuito, uma vez que

o valor de tensão entre fase e neutro (tensão de fase) da rede elétrica da universidade é de 220 V.

3.4.2 Medição dos parâmetros ambientais: análise operacional preliminar

No intuito de avaliar o questionário que foi elaborado e também de verificar questões operacionais como o tempo e os pontos de medição em sala, as primeiras medições de campo e pesquisas subjetivas foram realizadas no dia 18 de agosto de 2016, no período da noite. Com isso, foi possível apurar os ajustes necessários operacionalmente bem como obter um diagnóstico das variáveis de conforto térmico também numa condição de baixa temperatura.

A localização dos pontos de medição nas salas avaliadas procurou atender ao disposto na ABNT NBR 16401-2. A norma menciona que as medições de temperatura e de velocidade do ar devem ser realizadas no centro da zona ocupada e nos pontos onde os valores mais desfavoráveis dos parâmetros são suscetíveis de ocorrer. Neste sentido, optou-se por realizar as medições de temperatura e de velocidade do ar em pontos estratégicos da sala (zonas), de acordo com a ocupação por parte dos alunos, e foram efetuadas a 0,1 e 1,1 m do piso para o caso dos alunos (sentados) e a 1,7 m do piso para o caso do professor (de pé). Já as medições de temperatura de globo foram realizadas a 0,6 m do piso para o caso dos alunos e a 1,1 m do piso para o caso do professor. Quanto a umidade relativa do ar, foram realizadas quatro medições, com intervalos de 5 min, nos mesmos pontos em que foram realizadas as demais medições, ou seja, de acordo com as zonas de ocupação dos alunos na sala. Já externamente, foram realizadas medições para verificar a temperatura do ar (t_{bs}) e a umidade relativa do ar.

Durante a medição piloto e também após uma análise preliminar dos dados, foram constatados alguns pequenos ajustes operacionais que culminaram numa padronização das rotinas de medição, padrão este que seguiu durante todos os dias subsequentes em que foram realizadas as medições e as pesquisas subjetivas.

No questionário, primeiramente, foi necessário realizar ajustes em duas questões. A primeira questão ajustada, questão 5, trata da aceitabilidade do movimento do ar, na qual as alternativas foram reorganizadas de forma que facilitasse a interpretação dos participantes. Já na questão referente ao vestuário dos participantes, questão 10, foram reorganizadas e acrescentadas algumas opções de peças de roupa, uma vez que foram constatadas diversas complementações por partes dos alunos durante os primeiros questionários aplicados. Outro ajuste realizado no questionário foi a inclusão das questões 7 e 8. Este ajuste ocorreu após uma análise preliminar dos dados obtidos durante as medições, sendo que apenas nas últimas

cinco medições o questionário contemplou as duas questões relacionadas com a qualidade do ar.

A partir dos novos procedimentos de medição, estabeleceram-se alguns possíveis critérios de exclusão para os questionários como usuários que chegassem após o início do experimento; respostas de usuários que deixassem a sala durante a realização do experimento; questionários com dados inconsistentes ou com algum erro de marcação.

Operacionalmente, o principal ajuste foi em relação a colocação do medidor de estresse térmico nas salas avaliadas. No intuito de observar a inércia térmica dos sensores, passou-se a antecipar a disposição deste instrumento no ambiente avaliado em relação ao início das medições e aplicação dos questionários.

3.4.3 Medição dos parâmetros ambientais: protocolo de medições

Após o aprimoramento do método, ocorrido posteriormente ao experimento piloto, definiu-se um protocolo que foi utilizado durante as medições do experimento, realizadas de setembro a dezembro de 2016 e de janeiro a março de 2017. Cabe salientar que tanto a medição piloto quanto as primeiras medições subsequentes foram realizadas apenas nas salas com ventilação natural, uma vez que o sistema de ventilação mecânica teve sua instalação concluída apenas em dezembro de 2016.

Para a efetivação das medições, que iniciavam sempre 40 min após o início das aulas, de forma que os estudantes pudessem aclimatar-se ao ambiente, alguns procedimentos preliminares tinham de ser efetivados, como por exemplo, o medidor de estresse térmico disposto na sala no início da aula, para que os sensores se estabilizassem, bem como o acionamento do sistema de ventilação mecânica, no caso da sala C08108; janelas, portas e ventiladores de teto tinham suas intervenções de acordo com a vontade dos ocupantes, com exceção das janelas da sala C08108 que tinham que permanecer sempre abertas no intuito de promover a entrada do ar externo (fresco) pelo lado sul; as classes eram arranjadas de maneira a respeitar o leiaute interno pré-estabelecido.

Após serem explicadas as condições do experimento aos alunos, era enfatizado que eles deveriam manter suas atividades normais durante a aula. Os instrumentos de medidas foram posicionados em pontos estratégicos da sala, de acordo com a ocupação por parte dos alunos, observando as alturas e os procedimentos citados anteriormente.

Depois de respeitados os primeiros 40 minutos de aula, dividia-se hipoteticamente a sala em 4 ou 5 zonas, de acordo com a ocupação dos alunos, e dava-se início as medições

ambientais sendo os respectivos valores registrados manualmente em formulários específicos (Apêndices C e D), e ao preenchimento dos questionários. A partir daí, considerava-se que a taxa de metabolismo atingia um valor adequado ao experimento - atividade sedentária em escolas, com valor de 70 W/m^2 (1,2 met) para aulas expositivas onde os alunos tinham baixa interação; e taxa metabólica para a ocupação de professor, com valor de 1,4 - 1,7 met para o caso dos professores, conforme tabelas encontradas na ISO 8996/2004, anexos B e A, respectivamente. A Fig. (3.10) apresenta esquematicamente o protocolo de medições durante os dias de experimento.



- [1] Procedimentos preliminares
- [2] Disposição do termômetro de globo na sala avaliada
- [3] Acionamento do sistema de ventilação mecânica (C08108)
- [4] Medição das variáveis ambientais (umidade relativa com intervalos de 5 min)
- [5] Distribuição dos questionários
- [6] Registro dos valores em formulários
- [7] Recolhimentos dos questionários
- [8] Fechamento dos formulários
- [9] Desligamento do sistema de ventilação mecânica (C08108)

Figura 3.10 - Protocolo de medição durante os dias de pesquisa

Com os dados ambientais (temperatura do ar, velocidade do ar, umidade relativa e temperatura de globo) obtidos para cada posição dentro das salas de aula, de acordo com a localização em que os alunos apontavam no questionário, e os dados subjetivos, também registrados nos questionários, foram calculados os índices PMV e PPD a partir do software EES (*Engineering Equation Solver*), tendo como base as equações de troca de calor e o algoritmo apresentado pelo anexo normativo D da ISO 7730/2005. Os valores de saída foram validados por meio da tabela D.1 do mesmo anexo.

Também com os votos registrados nos questionários foi possível obter o índice de Voto Médio Real - AMV (*actual mean vote*), o valor de Porcentagem de Insatisfeitos Real - APD (*actual percentage dissatisfied*), correspondente ao percentual de votos “-3, -2, +2 e +3” da escala sétima, bem como a preferência e a aceitabilidade térmica dos usuários durante as medições.

3.5 Análise dos dados

Após a realização do experimento de campo, os dados foram organizados e reunidos em um banco feito a partir de uma planilha eletrônica. Com o auxílio de tabelas dinâmicas, foram realizadas análises com os dados que compreenderam 3 partes: a primeira parte apresentou os resultados das medições referentes aos parâmetros do sistema de ventilação mecânica bem como os respectivos índices de vazão de ar externo para cada dia de medição.

A segunda parte apresentou uma síntese do mapeamento e das medições realizadas, período, mês e quantidade de votos, assim como as variáveis ambientais e antropométricas observadas. Os dados foram arranjados em gráficos e tabelas que representaram a frequência, os valores máximos, médios e mínimos para cada variável.

A terceira parte considerou os dados referentes à sensação, preferência e aceitabilidade térmica dos usuários, bem como as análises referentes ao modelo de conforto analítico e ao modelo adaptativo. Na terceira parte também foi realizada uma análise comparativa entre os dados das salas com ventilação natural e da sala com sistema de ventilação mecânica considerando, evidentemente, apenas os dias e horários em que ambos os ambientes (salas) puderam ser avaliados um na sucessão de outro, já que por questões operacionais, não foi possível avaliar ambas as salas ao mesmo tempo.

A última parte compreendeu uma análise concentrada na sala C08108 onde, através dos dados das medições e questionários aplicados em diferentes dias, buscou-se relacionar a sensação térmica e a preferência e aceitabilidade do ambiente com diferentes taxas de renovação de ar proveniente do sistema de ventilação mecânica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados analisados e discutidos após a efetivação dos experimentos. Primeiramente, são apresentados os resultados das medições referentes aos parâmetros do sistema de ventilação mecânica. Em seguida, é apresentado um resumo com os dados obtidos nas medições junto aos usuários, que reuniram as caracterizações da população estudada e os dados ambientais. As duas últimas análises apresentam os resultados referentes à sensação, preferência e aceitabilidade térmica dos usuários, bem como as análises referentes ao modelo de conforto analítico e ao modelo adaptativo; os resultados referentes aos diagnósticos comparativos entre as salas com ventilação natural e a sala com sistema de ventilação mecânica e por último a influência da renovação de ar para os ocupantes da sala C08108.

4.1 Características do sistema de ventilação mecânica – sala C08108

Em relação as características do sistema de ventilação mecânica instalado na sala C08108, a Tab. (4.1) sumariza os parâmetros de funcionamento dos ventiladores, verificados através de medições. Para fins de identificação, o ventilador instalado próximo a porta de acesso da sala foi nomeado como VA e o seguinte como VB.

Tabela 4.1 - Características técnicas verificadas nos ventiladores instalados na sala C08108

	Ajuste de Velocidade	Vazão (m ³ /h)	Tensão elétrica (V)	Corrente elétrica (A)	Potência elétrica (W)	Nível de pressão sonora média na sala (dB(A)) *
VA	Vel. Rápida - VR	2058	217,0	1,29	279,9	VA e VB em VR
	Vel. Lenta - VL	1394	217,0	0,69	149,7	60,2
VB	Vel. Rápida - VR	1726	118,6	2,05	243,1	VA e VB em VL
	Vel. Lenta - VL	1323	118,6	1,45	172,0	53,4

* Ruído de fundo equivalente a 36,8 dB(A)

Os valores apresentados pela Tab. (4.1) referem-se ao sistema em funcionamento e retratam as condições verificadas no respectivo momento das medições. Em relação ao nível de pressão sonora, a ABNT NBR 10152/1987 recomenda que para salas de aula e laboratórios escolares o valor seja entre 40 e 50 dB(A).

Como já foi citado neste trabalho, um dos ventiladores (VB) tem como tensão nominal de funcionamento o valor de 127 V, de forma que foi necessária a implantação de um

transformador monofásico (220/120 V - 500 VA) ao circuito. Devido a este fato, é possível perceber que o valor de vazão de ar disponibilizado pelo VB é menor em relação ao VA, fato que pode ser justificado pelo menor valor da tensão elétrica de alimentação, neste caso 118,6 V.

Em função do ajuste de velocidade disponível em cada um dos ventiladores e tomando como base os valores medidos e apresentados na Tab. (4.1), a Tab. (4.2) apresenta as configurações possíveis para os ventiladores helicocentrífugos da sala C08108 e os respectivos valores de vazão de ar que o sistema pode fornecer.

Tabela 4.2 - Configurações disponíveis quanto aos valores de vazão de ar do sistema de ventilação mecânica na sala C08108

	VA		VB		Vazão (m ³ /h)
	VR	VL	VR	VL	
1	X		X		3785
2	X			X	3382
3		X	X		3120
4		X		X	2718
5	X				2058
6			X		1726
7		X			1394
8				X	1323

A partir destas configurações é que as análises das taxas de renovação de ar na sala proposta, conseqüentemente a relação das mesmas com as variáveis envolvendo o conforto térmico, na sala C08108 foram realizadas.

A Tab. (4.3), em sua última coluna, apresenta os índices de vazão de ar externo proporcionados pelo sistema de ventilação mecânica para cada medição realizada. Este índice configura-se como sendo o número de vezes acima do valor de vazão de ar externo por pessoa recomendado pela Portaria n° 3523, de 28 de agosto de 1998 do Ministério da Saúde e regulamentado pela resolução-RE n° 9, de 16 de janeiro de 2003.

Tabela 4.3 - Índices de vazão de ar externo na sala C08108

Medição	Data	Turno	Nº de ocupantes	Vazão sistema de ventilação (m ³ /h)	Vazão de ar externo por ocupante (m ³ /h)	Índice de vazão de ar externo
5	20/12/2016	Noite	16	3785	236,6	8,8
6	22/12/2016	Noite	12	3785	315,4	11,7
7	03/01/2017	Noite	15	3785	252,3	9,3
8	06/01/2017	Noite	15	2718	181,2	6,7
9	09/03/2017	Noite	16	2718	169,9	6,3
10	21/02/2017	Noite	25	3120	124,8	4,6
11	23/02/2017	Tarde	10	3120	312,0	11,6
12		Noite	24	3120	130,0	4,8
13	24/02/2017	Noite	15	3120	208,0	7,7
14	01/03/2017	Noite	24	1726	71,9	2,7
15	02/03/2017	Tarde	11	1726	156,9	5,8
16		Noite	24	3785	157,7	5,8
17	06/03/2017	Tarde	35	3785	108,1	4,0
18	07/03/2017	Noite	29	2058	71,0	2,6

Através da Tab. (4.3) é possível perceber que para a grande maioria das medições o valor de vazão de ar externo por ocupante ultrapassou no mínimo 4 vezes o valor recomendado pela norma nacional. Entende-se que esse parâmetro tem uma influência significativa na sensação térmica dos usuários e o mesmo será avaliado no item 4.4 deste trabalho.

4.2 Síntese dos dados obtidos durante as medições

As pesquisas para análise do conforto térmico nas salas de aula propostas reuniram um conjunto de 616 questionários, abrangendo alunos de graduação de diversos cursos. As medições foram realizadas nos meses de agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro de 2016 e janeiro, fevereiro e março de 2017, nos turnos manhã, tarde e noite, conforme sintetiza a Tab. (4.4). As medições foram realizadas de acordo com a disponibilidade das aulas e dos professores, sendo que a maior frequência de medições ocorreu durante os meses de 2017.

Tabela 4.4 - Síntese das medições realizadas

Medição	Data	Turno	Salas	Nº de questionários
1	18/08/2016	Noite	C06102	18
			C06104	9
2	22/08/2016	Manhã	C06109	17
			C06112	17
3	30/09/2016	Noite	C06111	28
4	25/11/2016	Noite	C05105	41
5	20/12/2016	Noite	C06108	12
			C08108	16
6	22/12/2016	Noite	C06108	12
			C08108	12
7	03/01/2017	Noite	C06108	12
			C08108	15
8	06/01/2017	Noite	C06108	11
			C08108	15
9	09/01/2017	Noite	C06108	12
			C08108	16
10	21/02/2017	Noite	C07110	31
			C08108	25
11	23/02/2017	Tarde	C07107	13
			C08108	9
12		Noite	C07108	28
			C08108	24
13	24/02/2017	Noite	C08109	11
			C08108	15
14	01/03/2017	Noite	C07107	27
			C08108	24
15	02/03/2017	Tarde	C05106	19
			C08108	11
16		Noite	C07108	29
			C08108	24
17	06/03/2017	Tarde	C08108	35
18	07/03/2017	Noite	C08108	29
Total				617
Questionários totalmente excluídos				1
Total de questionários avaliados				616

Através da Tab. (4.4) é possível perceber que as medições envolvendo a sala com o sistema de ventilação mecânica (C08108) iniciaram a partir de 20/12/2016. Até esta data, todas as intervenções haviam sido realizadas apenas nas salas com ventilação natural.

4.2.1 Caracterização dos usuários participantes das pesquisas

De acordo com os usuários dos ambientes avaliados, que participaram da pesquisa, a Fig. (4.1) apresenta a frequência dos estudantes e professores entrevistados em relação ao gênero.

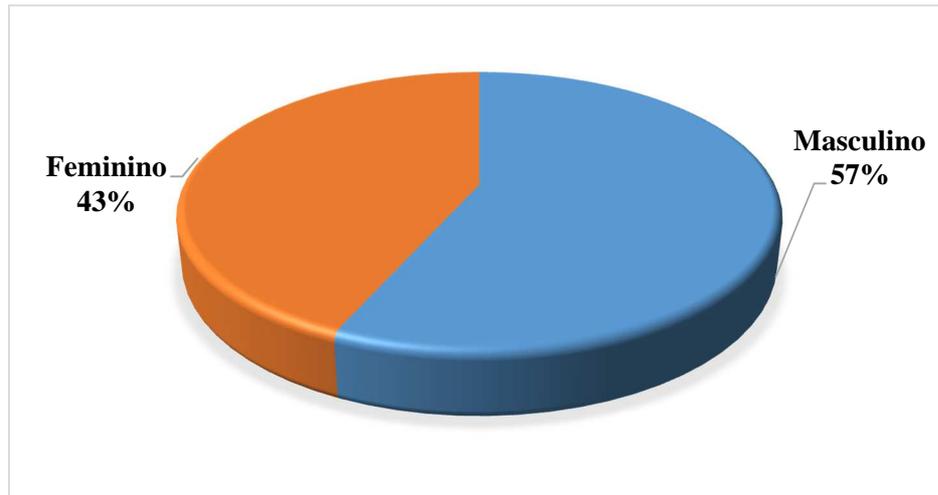


Figura 4.1 - Frequência de usuários masculinos e femininos durante as pesquisas

Conforme visualizado na Fig. (4.1), a distribuição dos públicos masculino e feminino teve uma relativa paridade. Em uma análise global, esta característica poderia ser benéfica, porém, em uma observação mais refinada é necessário analisar e considerar a distribuição de usuários masculinos e femininos em cada ambiente avaliado, ou seja, em cada sala onde foram realizadas as medições, uma vez que o gênero pode ser considerado como um fator que interage na percepção térmica. Em uma revisão bibliográfica que envolveu 466 artigos referentes ao conforto térmico no ambiente construído, Rupp, Vásquez e Lamberts (2015) comentam sobre estudos que apontaram que as mulheres são mais sensíveis à temperatura (principalmente baixa) e menos sensíveis à umidade do que os homens, e sentem-se mais desconfortáveis e insatisfeitas quando comparadas aos homens. De acordo com as pesquisas analisadas, as mulheres têm a temperatura da pele mais baixa em relação aos homens, sendo que estes preferem um ambiente ligeiramente mais frio e as mulheres preferem uma condição ligeiramente mais quente, apesar de ambos terem uma sensação prévia semelhante às temperaturas neutras.

A Tab. (4.5) detalha outras características dos participantes desta pesquisa, como os dados relacionados à idade, massa (peso) e altura dos entrevistados, bem como os índices de vestimenta e isolamento térmico (clo).

Tabela 4.5 - Caracterização dos participantes da pesquisa

Característica	Mínimo	Média	Máximo	Desvio padrão
Idade (anos)	17	23,2	65	6,0
Peso (kg)	45	71,3	116	14,6
Altura (m)	1,50	1,73	1,98	0,09
Isolamento das roupas (clo)	0,20	0,43	1,44	0,25

Em relação a idade dos entrevistados houve uma variação de 17 a 65 anos, enquanto que a massa (peso) oscilou entre 45 e 116 kg e a altura entre 1,50 e 1,98 m. Em relação ao índice de isolamento térmico das roupas dos participantes, houve uma grande variação, fato que já era esperado, já que as primeiras medições e pesquisas foram realizadas no mês de agosto, sob condições de baixas temperaturas, típicas da estação. Quanto às taxas de metabolismo dos usuários das salas avaliadas, foram adotados os valores já mencionados no capítulo 3 deste trabalho.

Ainda sobre a caracterização dos usuários que participaram desta pesquisa, desconsiderando os questionários com informações faltantes, 90% dos participantes tinham entre 17 e 30 anos. Em relação ao peso, 74% do público feminino tinha entre 45 e 65 kg e 70% do público masculino tinha entre 60 e 85 kg. Já em relação à altura, 83% das mulheres tinham entre 1,50 e 1,70 m e 75% dos homens tinham entre 1,70 e 1,85 m. Estes dados ajudam a melhor definir o público participante, uma vez que a análise de todos estes fatores, juntos, podem fornecer algumas limitações do trabalho.

4.2.2 Caracterização das variáveis ambientais

A partir dos dados registrados pela utilização dos instrumentos de medidas durante as medições, obtiveram-se as caracterizações qualitativas das condições climáticas das salas de aulas avaliadas. O Apêndice B apresenta uma tabela que auxilia na caracterização das variáveis ambientais observadas.

Os valores apresentados na Tab. (B.1) mostram que durante os meses de verão, em muitos momentos, os usuários das salas avaliadas estavam expostos a valores de temperaturas operativas muito próximos ou até mesmo superiores a 30 °C. Mesmo na sala com o sistema de ventilação mecânica, apenas em quatro oportunidades o valor de temperatura operativa foi inferior em relação a salas com ventilação natural, que foram avaliadas sob condições climáticas semelhantes.

Em relação a velocidade média do ar, mesmo na sala com o sistema de ventilação mecânica, os baixos valores encontrados sugerem que o modelo de Temperatura Efetiva Padrão (SET) não seja utilizado nas análises. A ASHRAE 55/2013 propõe que este modelo seja aplicado para avaliar todos os casos de conforto sob condições de velocidade do ar elevada, acima de 0,2 m/s, fato que só ocorreu em duas oportunidades para a sala proposta e ainda assim os valores médios foram de 0,23 m/s e 0,25 m/s.

A Tab. (4.6) apresenta os valores de temperatura média do ar (t_{bs}) nas salas e também os valores da temperatura do ar externo durante as medições realizadas.

Tabela 4.6 - Valores de temperatura interna e externa do ar nas salas avaliadas

Medição	Data	Turno	Sala	Nº de ocupantes	Temperatura média do ar (°C)	Temperatura Externa (°C)	Δt (°C)
1	18/08/2016	Noite	C06102	18	19,0	16,0	3,0
			C06104	9	17,1	16,0	1,1
2	22/08/2016	Manhã	C06109	17	15,2	10,0	5,2
			C06112	17	14,8	10,0	4,8
3	30/09/2016	Noite	C06111	28	23,6	16,0	7,6
4	25/11/2016	Noite	C05105	41	27,5	23,8	3,7
5	20/12/2016	Noite	C06108	12	29,5	27,2	2,3
			C08108	16	29,5	27,6	1,9
6	22/12/2016	Noite	C06108	12	28,7	24,6	4,1
			C08108	12	27,7	26,1	1,6
7	03/01/2017	Noite	C06108	12	30,7	27,1	3,6
			C08108	15	31,0	29,6	1,4
8	06/01/2017	Noite	C06108	11	25,7	23,5	2,2
			C08108	15	25,7	23,9	1,8
9	09/01/2017	Noite	C06108	12	29,2	26,5	2,7
			C08108	16	28,6	26,4	2,2
10	21/02/2017	Noite	C07110	31	27,6	24,9	2,7
			C08108	25	28,6	26,8	1,8
11	23/02/2017	Tarde	C07107	13	29,6	30,7	-1,1
			C08108	9	29,0	30,5	-1,5
12		Noite	C07108	28	28,6	26,2	2,4
			C08108	24	28,6	27,0	1,6
13	24/02/2017	Noite	C08109	11	28,4	26,0	2,4
			C08108	15	28,7	26,1	2,6
14	01/03/2017	Noite	C07107	27	29,2	27,3	1,9
			C08108	24	29,2	27,5	1,7

15	02/03/2017	Tarde	C05106	19	34,2	35,1	-0,9
			C08108	11	32,8	34,5	-1,7
16		Noite	C07108	29	30,1	28,2	1,9
			C08108	24	31,0	29,0	2,0
17	06/03/2017	Tarde	C08108	35	29,2	29,4	-0,2
18	07/03/2017	Noite	C08108	29	28,2	25,2	3,0

Através dos valores apresentados na Tab. (4.6) é possível perceber que para todos os dias de medições houve uma diferença de temperatura entre o ambiente interno (salas de aula) e o ambiente externo, o que já era esperado devido as cargas térmicas internas do ambiente ou, para os casos de medições realizadas durante a tarde, devido a inercia térmica do ambiente. Porém, aqui chama-se a atenção de que na maioria das ocasiões em que foram coletadas as variáveis ambientais na sala com sistema de ventilação mecânica no período da noite, esta apresentou um valor menor na diferença de temperatura (Δt) entre o ambiente externo e o interno em relação às salas com ventilação natural. Já para as medições comparativas realizadas durante o período da tarde, nas duas ocasiões a sala C08108 apresentou um Δt maior, ou seja, o valor da temperatura interna manteve-se mais distante do valor da temperatura externa, na comparação com as outras duas salas avaliadas. A situação, principalmente, em relação ao período noturno, demonstra que o sistema de ventilação mecânica foi capaz de aproximar o valor interno de temperatura ao externo devido a renovação de ar na sala, ocasionada pelas trocas com ambiente externo.

Ainda em relação a Tab. (4.6), nota-se que a maior diferença entre os valores externo e interno de temperatura (7,6 °C) foi observada no dia 30/09/2016, correspondente a medição 3. Na ocasião, a sala tinha 28 ocupantes e a medição foi realizada durante o turno da noite. Neste período do ano (primavera), é comum para o clima de São Leopoldo dias com temperaturas amenas ou ligeiramente altas e noites com queda de temperatura. Ao que tudo indica, durante o período da medição a sala ainda apresentava, internamente, um valor maior de temperatura devido a inércia térmica de suas paredes e teto. Numa comparação com a medição 4 (25/11/2016), quando 41 usuários estavam presentes na sala avaliada, a diferença de temperatura entre os ambientes externo e interno foi de 3,7 °C. Em uma análise preliminar este dado pode ser contraditório uma vez que a carga térmica interna devido ao número de pessoas foi maior no segundo caso, porém, ao analisar e comparar os valores de temperatura externa nestas duas ocasiões, verifica-se um diferencial de temperatura (Δt) de 7,8 °C, ou seja, a temperatura externa durante a medição de novembro permaneceu amena. Outro fato que pode explicar esta diferença de temperatura menor entre os ambientes externo e interno

mesmo com uma carga térmica interna maior é a velocidade relativa do ar. A Tab. (B.1), no apêndice B, mostra que na sala C06111 (30/09/2016), a velocidade média do ar foi de apenas 0,02 m/s, já na sala C05105 (25/11/2016) a velocidade média do ar foi de 0,28 m/s. Conforme observações e anotações que foram realizadas em ambas as situações, as janelas da sala C06111 estavam todas fechadas enquanto na sala C05105 estavam todas abertas. Estes dados podem indicar também que houve uma taxa de renovação de ar maior na sala C05105, o que pode ter contribuído no decréscimo da diferença de temperatura entre o exterior e o interior da sala.

Cabe salientar que nas medições 1 e 2, o valor de temperatura do ar externo foi considerado o mesmo, uma vez que foi realizada medição única, já que ambas as salas localizam-se no mesmo corredor.

4.3 Condições de conforto térmico nas salas de aula avaliadas

No intuito de melhor comparar a sala C08108 com as demais salas deste estudo, as análises realizadas nesta seção, com exceção da Fig. (4.4), consideram as medições realizadas a partir de dezembro de 2016, em função da disposição do sistema de ventilação mecânica. Optou-se nesta pesquisa por não analisar as zonas de ocupação dos professores uma vez que, conforme tabelas normativas, os mesmos apresentam uma taxa metabólica diferente dos alunos, de forma que esta situação poderia fazer com que suas respectivas zonas descaracterizassem as médias gerais nas salas, em relação aos índices avaliados.

4.3.1 Análise da sensação térmica nas salas avaliadas

A Fig. (4.2) apresenta a distribuição, em forma de frequência, das sensações térmicas dos usuários de acordo com as faixas dos valores de temperatura operativa observados durante as medições realizadas nas salas comparativas.

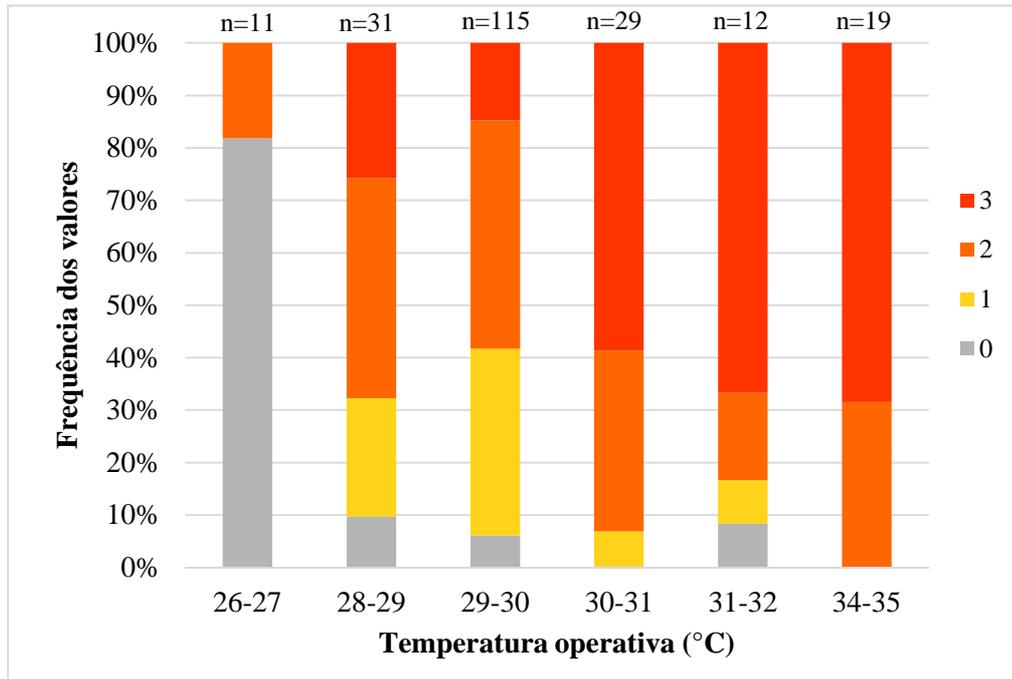


Figura 4.2 - Sensação Térmica dos usuários de acordo com os valores de temperatura operativa nas salas comparativas

Ao analisar a Fig. (4.2) é possível perceber que à medida que o valor da temperatura operativa aumenta o percentual de votos dos usuários em direção ao extremo da escala sétima de sensação térmica também aumenta. A faixa compreendida entre 31°C e 32°C corresponde a medição 7, realizada na sala C06108. Nesta ocasião os dois usuários que manifestaram seus votos como “neutro” (0) e “levemente com calor” (1) estavam sob o efeito dos ventiladores de teto, de forma que a respectiva zona na sala apresentou $v_{ar} = 0,35$ m/s, fato que pode ter influenciado os respectivos votos de sensações térmica.

A Fig. (4.3) apresenta a distribuição, em forma de frequência, das sensações térmicas dos usuários de acordo com as faixas dos valores de temperatura operativa observados durante as medições realizadas na sala C08108.

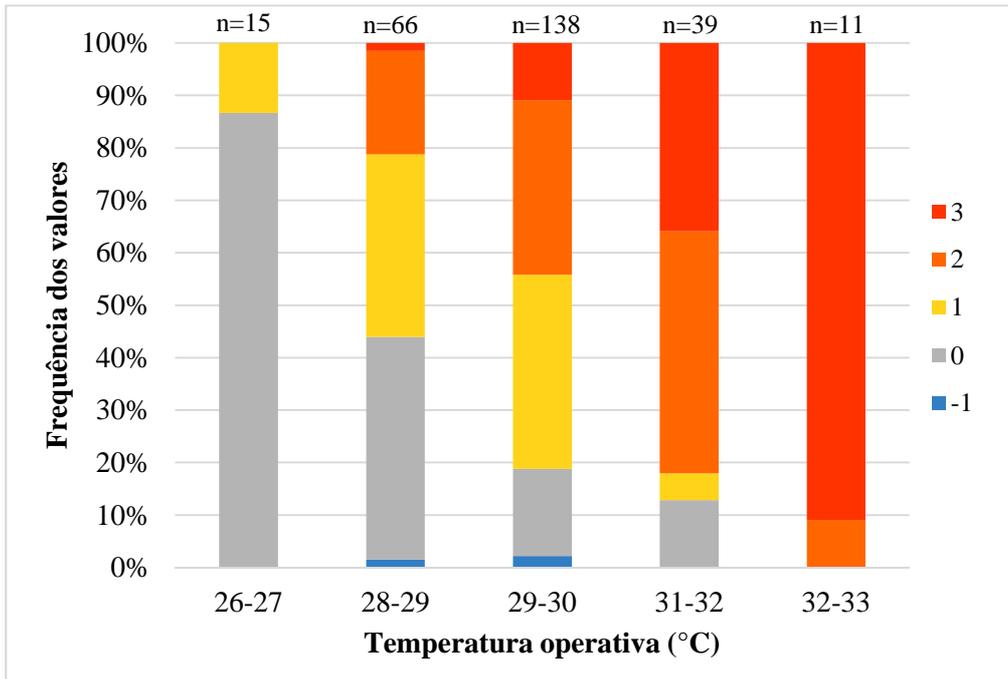


Figura 4.3 - Sensação Térmica dos usuários de acordo com os valores de temperatura operativa na sala C08108

Na comparação geral da sala C08108 com as demais salas avaliadas, a Fig. (4.3) retrata maiores percentuais em relação aos votos de “neutralidade térmica” (0) para quatro faixas de temperatura operativa, ou seja, em relação a sensação térmica percebida pelos usuários, a sala C08108 apresentou condições mais favoráveis.

Para efeito de análise dos resultados obtidos durante as primeiras medições, ainda sem a sala com o sistema de ventilação mecânica, a Fig. (4.4) apresenta a distribuição, em forma de frequência, das sensações térmicas dos usuários de acordo com as faixas dos valores de temperatura operativa observados nas salas.

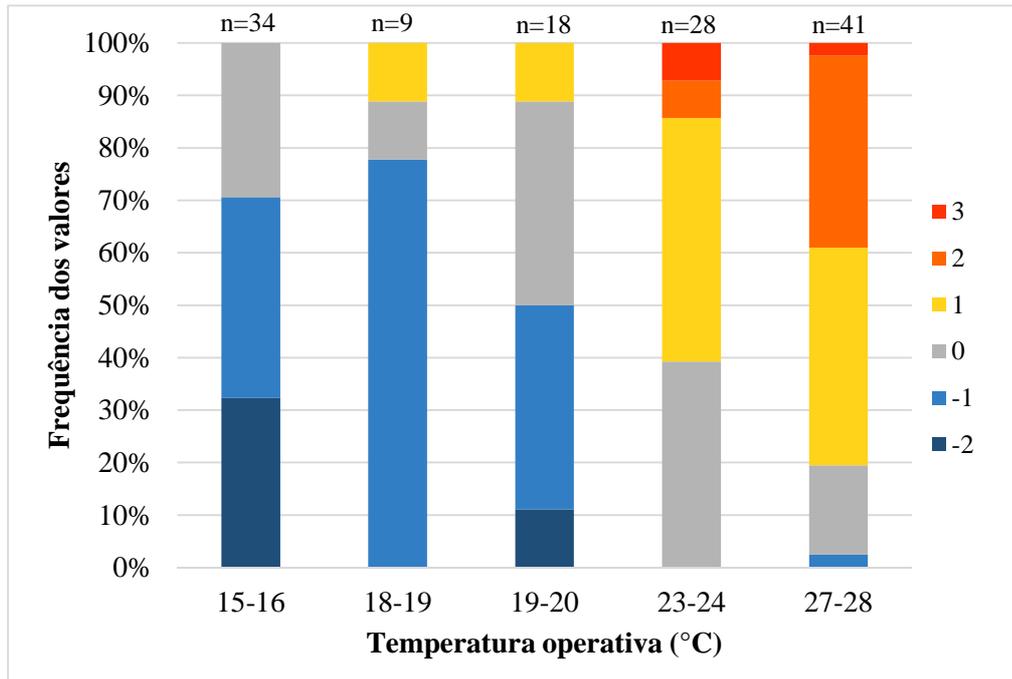


Figura 4.4 - Sensação Térmica dos usuários de acordo com os valores de temperatura operativa nas medições 1 a 4

Alguns fatores podem ser destacados destas primeiras análises, como por exemplo, a inexistência de voto “com muito frio”, mesmo durante as medições realizadas na estação mais fria. No decurso da medição 2, por exemplo, quando o valor de temperatura do ar externo foi de 10 °C, internamente as temperaturas operativas médias do ar ficaram próximas dos 15 °C, este fato pode justificar a ausência de votos “com muito frio”, além de fatos adaptativos como a vestimenta dos usuários de acordo com a estação mais fria, que consequentemente eleva o valor do isolamento térmico das roupas (c_{lo}) e influencia diretamente na sensação térmica do indivíduo. Durante a medição 2, o c_{lo} médio dos usuários das salas avaliadas foi de 1,07.

Outra questão percebida, analisando os gráficos das Fig. (4.2) e (4.4), é o maior número de votos “neutro” para a faixa de temperatura operativa compreendida entre 26 °C e 27 °C em relação aos votos “neutro” para a faixa entre 23 °C e 24 °C. Mais uma vez questões relacionadas a vestimenta e outras ações adaptativas no ambiente, como a abertura de janelas, explicam tal fato. Como exemplo, cita-se a medição 3 ($t_o = 23,9$ °C) na sala C06111, quando foi observado um c_{lo} médio de 0,75, já na medição 8 ($t_o = 26,4$ °C), realizada na sala C06108, o c_{lo} médio foi de 0,40. Este fato mostra a influência do isolamento térmico das roupas na sensação térmica dos usuários e como as características inerentes ao contexto, neste caso as condições climáticas externas, norteiam a questão do conforto adaptativo.

Além disso, questões físicas e fisiológicas dos indivíduos também se fazem presentes neste tipo de pesquisa e não devem ser esquecidas. Analisando, por exemplo, na Fig. (4.4), durante a medição 4 (25/11/2016), para uma temperatura operativa de 28 °C os usuários manifestaram seus votos de maneira que cinco dos sete valores possíveis da escala de sensação térmica foram utilizados, porém, numa análise mais detalhada percebe-se que durante a respectiva medição, apenas um usuário votou “com frio” e apenas um usuário votou “com muito calor”. Conforme dados registrados, o usuário com voto (-1) era do sexo feminino e tinha um índice de massa corporal (IMC) igual a 20,83, valor considerado normal com base em recomendações da Organização Mundial da Saúde (OMS). Já o usuário com voto (+3) era do sexo masculino e tinha o IMC igual a 30,93, valor considerado como obesidade grau I pelo mesmo órgão de saúde. Ao analisar os indicadores antropométricos associados ao conforto térmico, De Vecchi (2015) concluiu que a temperatura (SET) neutra preferida, encontrada para um grupo de ocupantes com peso normal foi de 24,6 °C e nos grupos considerados acima do peso e obesos os valores foram de 22,9 °C e 21,9 °C, respectivamente.

Ainda em relação a sensação térmica, a Fig. (4.5) apresenta as diferenças entre as sensações térmicas relatadas entre os usuários do sexo feminino e masculino.

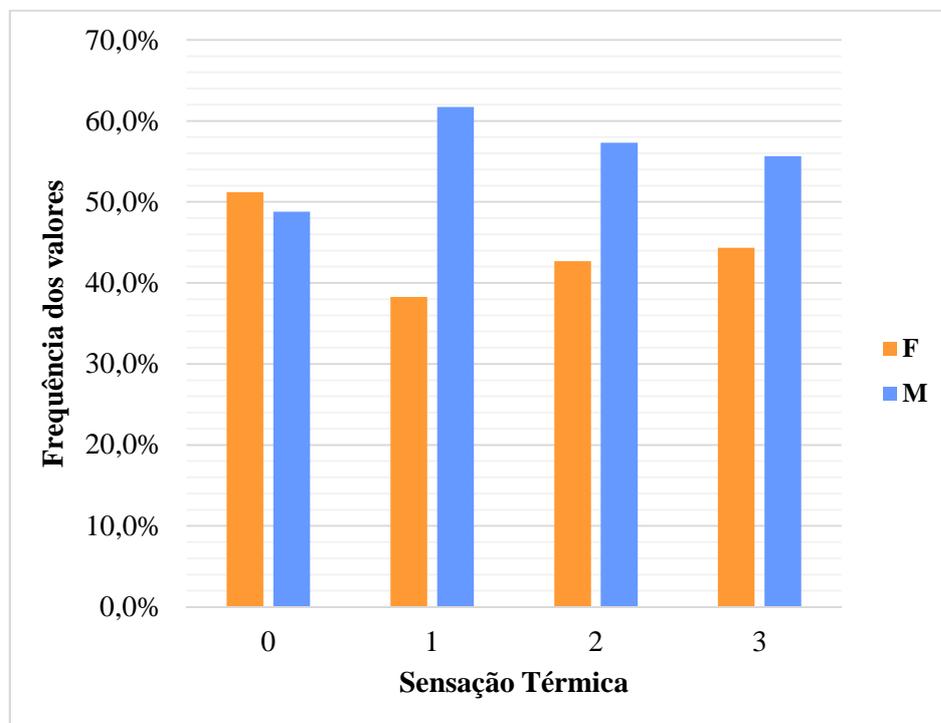


Figura 4.5 - Sensação térmica dos usuários em relação ao gênero

O gráfico da Fig. (4.5) destaca os valores positivos da escala sétima, ou seja, os que representam o aumento do desconforto por calor. Ao analisar separadamente os votos femininos e masculinos, verificou-se que para cinco dos seis níveis votados durante as pesquisas, o público masculino apresentou um percentual maior de votos. Porém, para o voto que representa a neutralidade térmica, os usuários do sexo feminino tiveram um valor que representou apenas 2% acima do valor registrado para o sexo masculino. Os resultados vão ao encontro do que mencionam Rupp, Vásquez e Lamberts (2015) em sua revisão bibliográfica, no que diz respeito as mulheres preferirem uma condição ligeiramente mais quente, apesar de ambos os gêneros terem uma sensação prévia semelhante às temperaturas neutras.

Esta situação levou à análise de como estes ocupantes estariam vestidos, para que fosse possível verificar se a vestimenta influenciou ou não a sensação térmica dos usuários masculinos e femininos. As Fig. (4.6), (4.7), (4.8) e (4.9) apresentam a distribuição, em forma de frequência, dos índices de clo dos usuários de acordo com as faixas dos valores de temperatura operativa observados durante as medições realizadas. As figuras comparam os usuários masculinos e femininos.

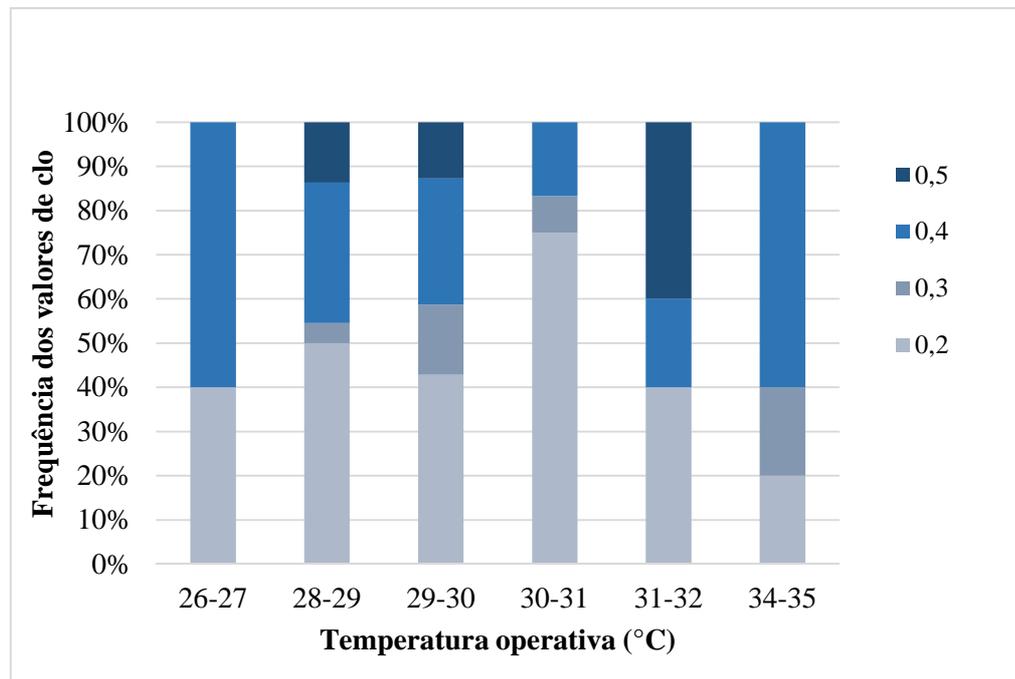


Figura 4.6 - Índice “clo” de usuários do sexo masculino de acordo com a temperatura operativa nas salas comparativas

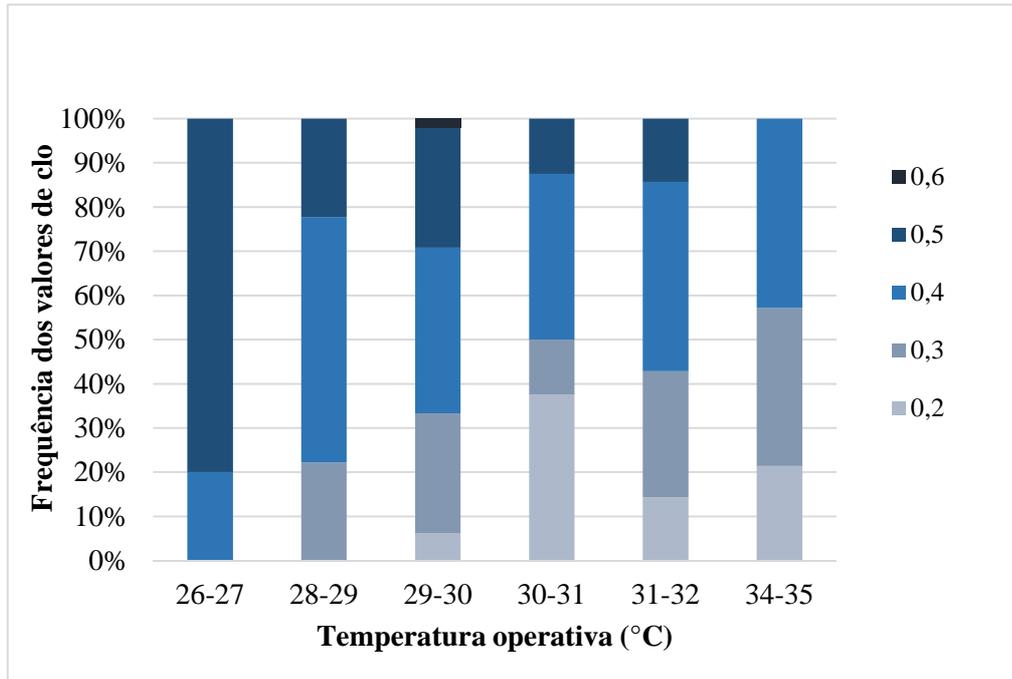


Figura 4.7 - Índice “clo” de usuários do sexo feminino de acordo com a temperatura operativa nas salas comparativas

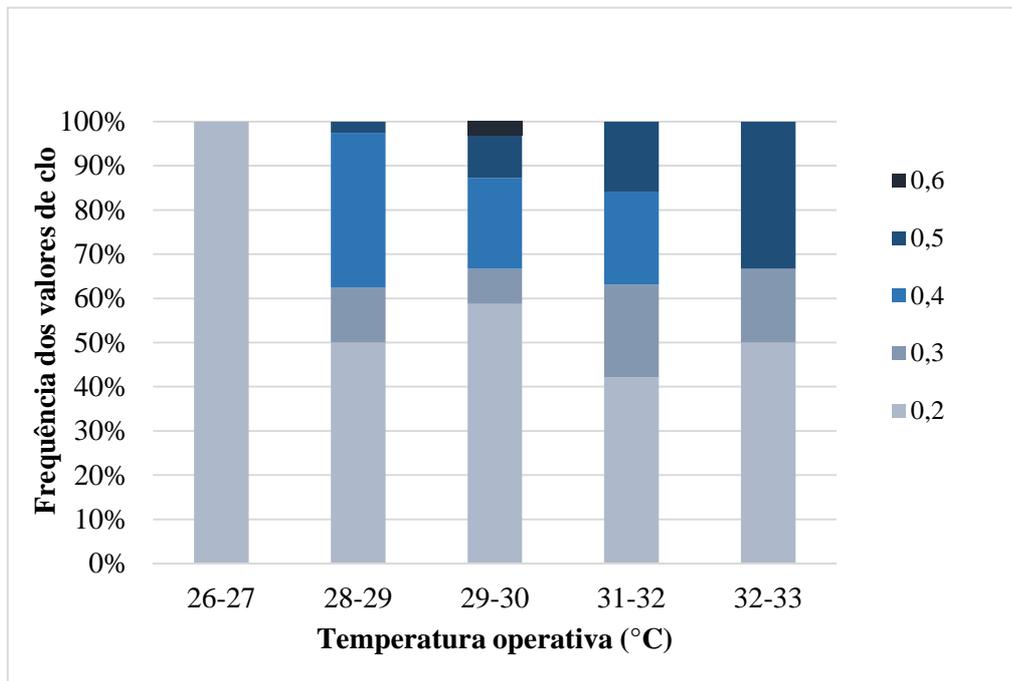


Figura 4.8 - Índice “clo” de usuários do sexo masculino de acordo com a temperatura operativa na sala C08108

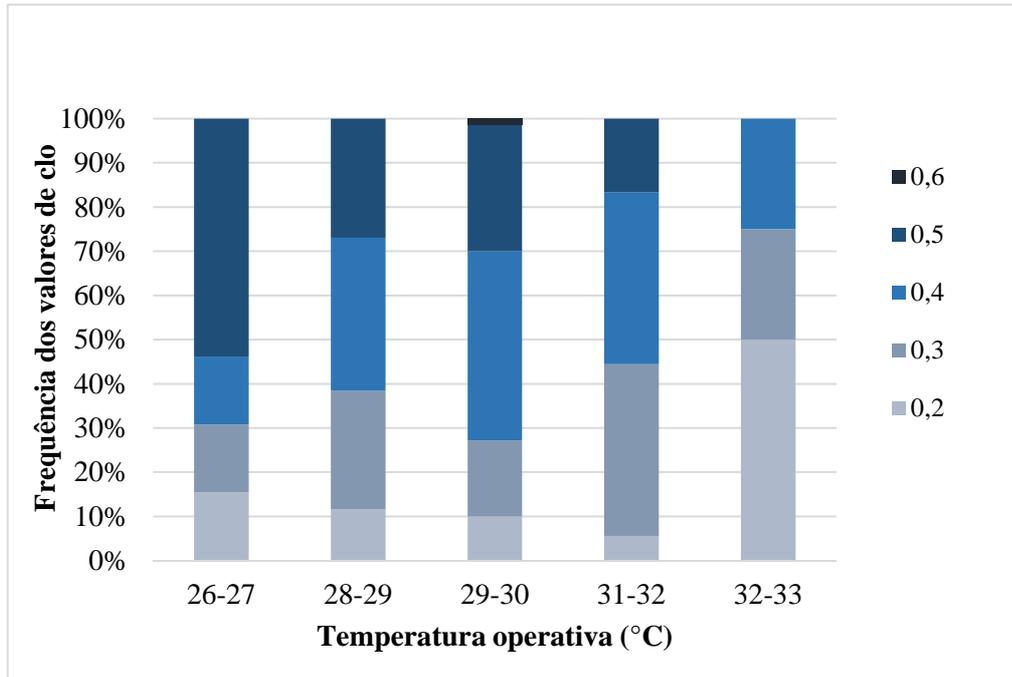


Figura 4.9 - Índice “clo” de usuários do sexo feminino de acordo com a temperatura operativa na sala C08108

Ao analisar as Figs. (4.6), (4.7), (4.8) e (4.9) que compararam os índices de isolamento térmico das roupas de homens e mulheres de acordo com a temperatura operativa das salas, descartou-se a hipótese de os usuários do sexo feminino estarem com índices de clo inferiores aos índices do sexo masculino e, em decorrência, sentirem-se mais comumente com frio. É possível perceber que usuários do sexo feminino se apresentam constantemente com índices semelhantes aos índices do sexo masculino, sendo que em algumas situações os índices foram até superiores. Também é possível perceber que não há diferenças significativas entre os usuários da sala C08108 com os usuários das demais salas no que se refere a média dos valores de isolamento térmico das roupas. Cabe salientar que durante a medição 8 ($t_o = 26,4$ °C) na sala C08108, foi obtida e consequentemente analisada a resposta de apenas um usuário do sexo masculino neste dia.

Ainda no intuito de comparar as salas com ventilação natural e a sala com sistema de ventilação mecânica, a Fig. (4.10) apresenta a média dos votos de sensação térmica (AMV médio) dos usuários de acordo com os valores de temperatura operativa encontrados em cada zona das salas avaliadas, durante as medições realizadas.

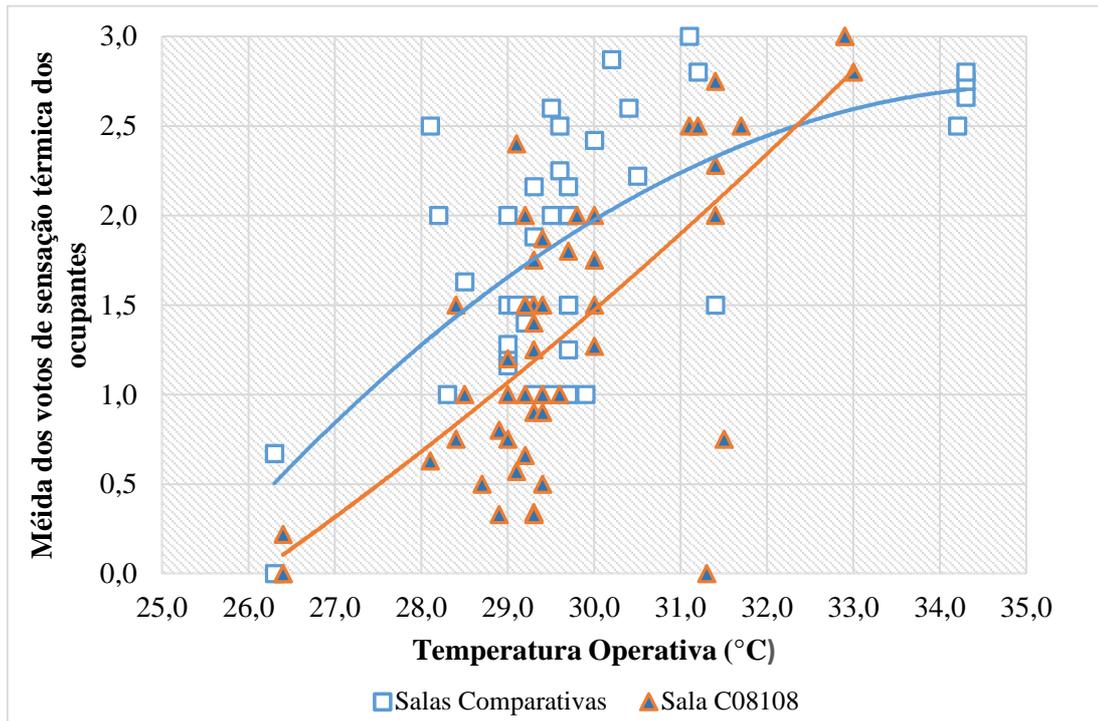


Figura 4.10 - Comparação entre as salas de acordo com a sensação térmica (AMV médio) em função da temperatura operativa durante as medições

Analisando a dispersão da Fig. (4.10), verifica-se que, de forma geral, para uma temperatura operativa com valores entre 26 °C e 31 °C os usuários da sala C08108 manifestaram melhores condições de sensação térmica, comparados aos usuários das demais salas avaliadas, podendo ser destacados alguns fatos pontuais. Verificando-se, por exemplo, alguns pontos distantes da curva de tendência pode-se encontrar condições ou variáveis que fizeram com que os usuários daquela zona manifestassem uma sensação térmica melhor ou pior em relação ao esperado.

Durante a medição 7, na sala C08108, os ocupantes de duas zonas manifestaram seus votos de sensação térmica de forma que o AMV médio foi de 0,0 para a zona A e de 0,75 para a zona B, para temperaturas operativas de 31,3 °C e 31,5 °C, respectivamente. Neste caso, avaliando os dados detalhadamente, pode-se salientar que ambas as zonas estavam sob a influência dos ventiladores de teto. Apesar disso, apenas a zona A estava com uma condição de velocidade do ar um pouco acima da média da sala neste dia, neste caso para a zona A foi verificado $v_{ar} = 0,20$ m/s. Porém, na zona B as três pessoas envolvidas na pesquisa eram do sexo feminino, sendo que duas participantes estavam com um clo de 0,25. Estes fatos podem de alguma forma justificar os votos mais próximos do valor de neutralidade térmica. Ainda em relação a sala C08108, durante a medição 14, os ocupantes da zona A apresentaram uma

média 2,40 na escala de sensação térmica, para uma $t_o = 29,1$ °C. Realizando uma análise detalhada verificou-se que a zona não estava sob a influência de ventiladores de teto e que os participantes pertencentes a esta zona, estavam próximos a parede norte, ou seja, longe das janelas, apesar de alguns estarem próximos a porta da sala, que neste dia estava aberta. Outro fato que chamou a atenção é que neste dia intencionalmente um dos ventiladores do sistema de ventilação mecânica estava desligado, estando a sala apenas sob ação do VB, localizado próximo ao fundo da sala, o que fez com que o índice de vazão de ar externo, conforme Tab. (4.3) fosse de apenas 2,7 neste dia.

Em relação às salas comparativas, durante a medição 7, na sala C06108, os ocupantes da zona A manifestaram seus votos de sensação térmica de forma que o AMV médio foi de 1,50, para uma $t_o = 31,4$ °C. Mais uma vez constatou-se que os ocupantes desta zona estavam sob o efeito dos ventiladores de teto, o que fez com que na zona fosse verificado uma velocidade média do ar de 0,35 m/s, sendo o maior valor encontrado na sala neste dia. Também em relação às salas comparativas, durante a medição 10, na sala C07110, a zona A apresentou uma média de 2,50 em relação aos votos de sensação térmica de seus ocupantes, para uma $t_o = 28,1$ °C. Numa análise detalhada verificou-se que a zona não estava sob o efeito de ventiladores de teto e os ocupantes estavam próximos a parede norte. Para esta ocasião também chama a atenção que cinco dos seis ocupantes da zona eram do sexo masculino.

É interessante notar que nos exemplos citados anteriormente, cujas zonas estavam sob o efeito de ventiladores de teto e com valores muito próximos de temperatura operativa, os ocupantes da sala C08108 manifestaram índices AMV bem abaixo dos ocupantes da sala comparativa. Outro fato que pode ser destacado, observando o gráfico da Fig. (4.10), é que para valores de temperatura operativa entre 28 °C e 30 °C não foram observados votos de sensação térmica cujas médias nas zonas fossem menores que 1,0 para as salas comparativas. Já para a sala C08108 observa-se diversos pontos com AMV médio abaixo de 1,0, sugerindo que os ocupantes destas zonas estavam sob melhores condições de conforto térmico, uma vez que os índices estavam mais próximos do valor de neutralidade térmica.

Considerando todos os dias de medições comparativas, os ocupantes da sala C08108 manifestaram seus votos de forma que o índice AMV médio geral foi de 1,45, com desvio padrão de 1,07, já para as demais salas o índice AMV médio geral foi de 1,87, sendo o desvio padrão 0,94. Este valor elevado de desvio padrão se justifica devido a grande diferença nas condições ambientais verificadas ao longo das medições, o que naturalmente gerou diferentes valores de AMV.

4.3.2 Análise da preferência térmica nas salas avaliadas

Em relação a preferência térmica, a Fig. (4.11) apresenta as repostas dos usuários, em forma de frequência, de acordo com as faixas dos valores de temperatura operativa nas salas comparativas.

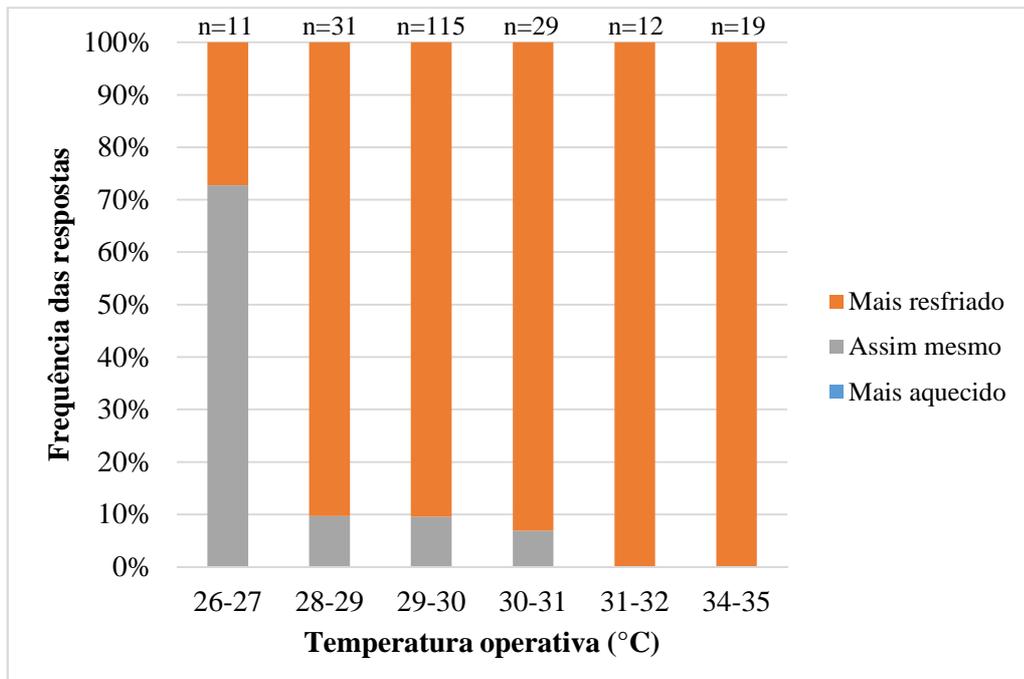


Figura 4.11 - Preferência térmica dos usuários de acordo com a temperatura operativa nas salas comparativas

Para a análise da Fig. (4.11) foram suprimidas as repostas dos usuários da sala C08108, de forma que pudesse ser verificada a percepção dos usuários nas condições originais e sem a influência do sistema de ventilação mecânica. É possível perceber, considerando as faixas de temperatura operativa analisadas, que para a faixa compreendida entre 26 °C e 27 °C a maioria dos usuários tinha sua preferência térmica estabelecida. Este resultado assemelha-se ao encontrado por Mishra e Ramgopal (2015), para salas de aula naturalmente ventiladas do Instituto Indiano de Tecnologia de Kharagpur, onde o valor de temperatura operativa preferido pelos ocupantes foi de 26,8 °C. Na Fig. (4.11), percebe-se que a partir de 28 °C, a demanda por uma condição “mais resfriado” obteve sempre um percentual maior de votos.

Para comparar a sala C08108 com as demais salas, a Fig. (4.12) apresenta a preferência térmica, em forma de frequência, de acordo com a temperatura operativa na sala C08108.

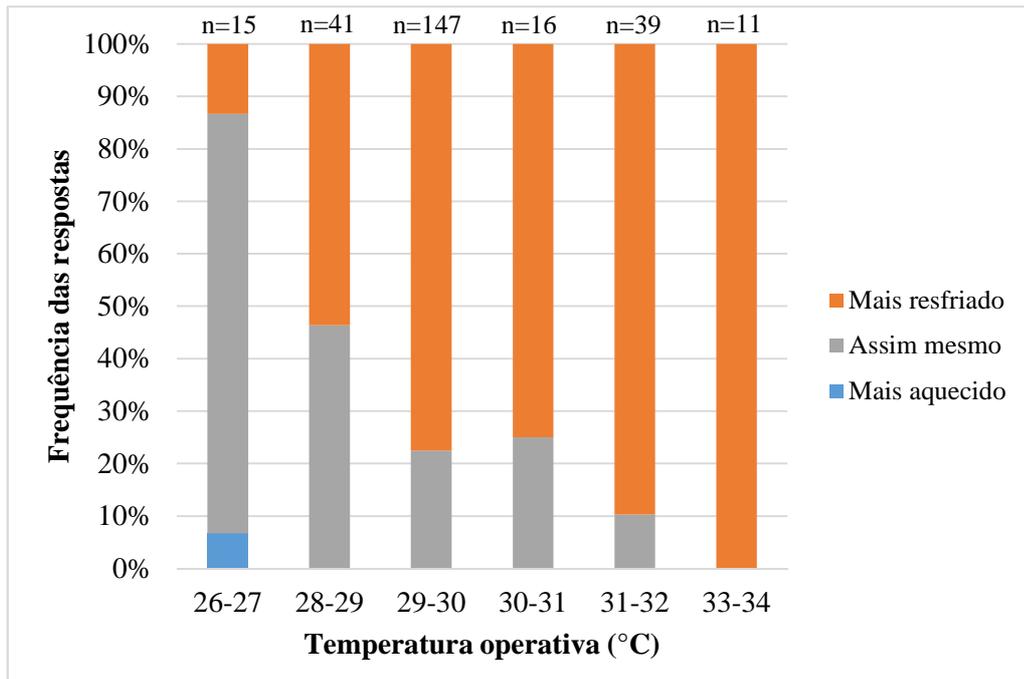


Figura 4.12 - Preferência térmica dos usuários de acordo com a temperatura operativa na sala C08108

Analisando o gráfico da Fig. (4.12), também se percebe que, considerando as faixas de temperatura operativa analisadas, entre 26 °C e 27 °C a maioria dos usuários tinha sua preferência térmica estabelecida, porém, considerando todas as faixas de temperatura operativa analisadas nota-se que o percentual de usuários que indicaram preferir estar sob a condição avaliada aumentou para cinco das seis faixas.

Ainda em relação a Fig. (4.12), salienta-se que a faixa compreendida entre 30 °C e 31 °C equivale somente a medição 5, cuja temperatura operativa média na sala C08108 foi de 30 °C. Neste dia, os ventiladores de teto estavam desligados e o sistema de ventilação mecânica, que estava com os ventiladores em VR, proporcionou um índice de vazão de ar externo na sala que correspondeu a 8,8 vezes o valor recomendado pela ABNT NBR 16401-3, ocasionando em termos de ambiente uma taxa de renovação de 16,7 trocas de ar por hora.

4.3.3 Análise dos índices PMV em relação aos índices AMV

No intuito de comparar os resultados reais obtidos em relação a sensação térmica dos usuários aos resultados calculados segundo o modelo estático, as Fig. (4.13) e (4.14) apresentam o AMV médio e o PMV médio, de acordo com os valores de temperatura operativa encontrados em cada uma das zonas nas salas, durante as medições realizadas.

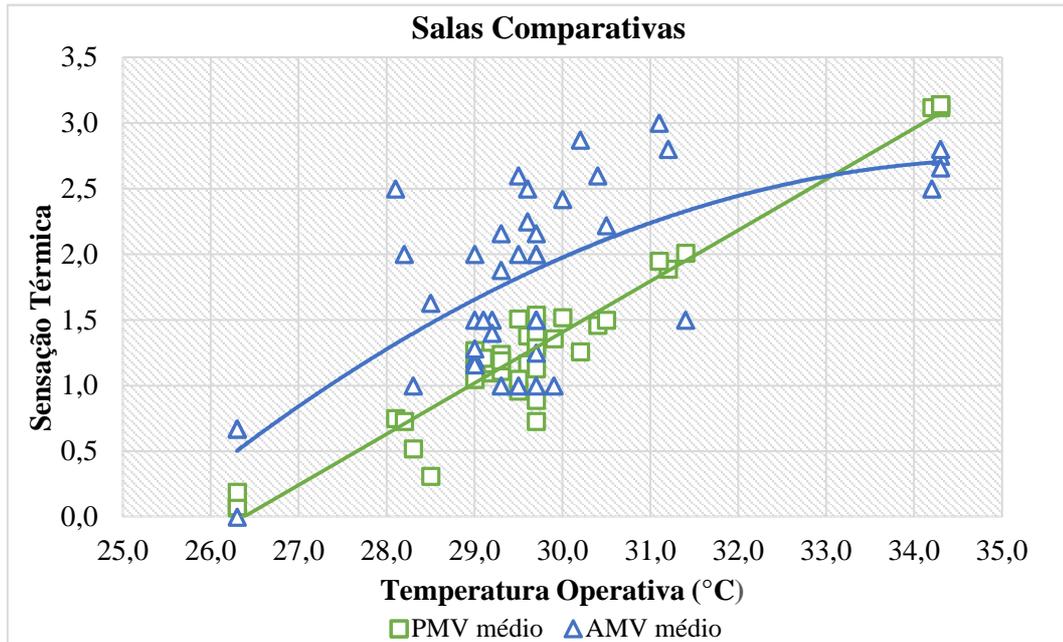


Figura 4.13 - Comparação entre o PMV médio e o AMV médio nas salas comparativas

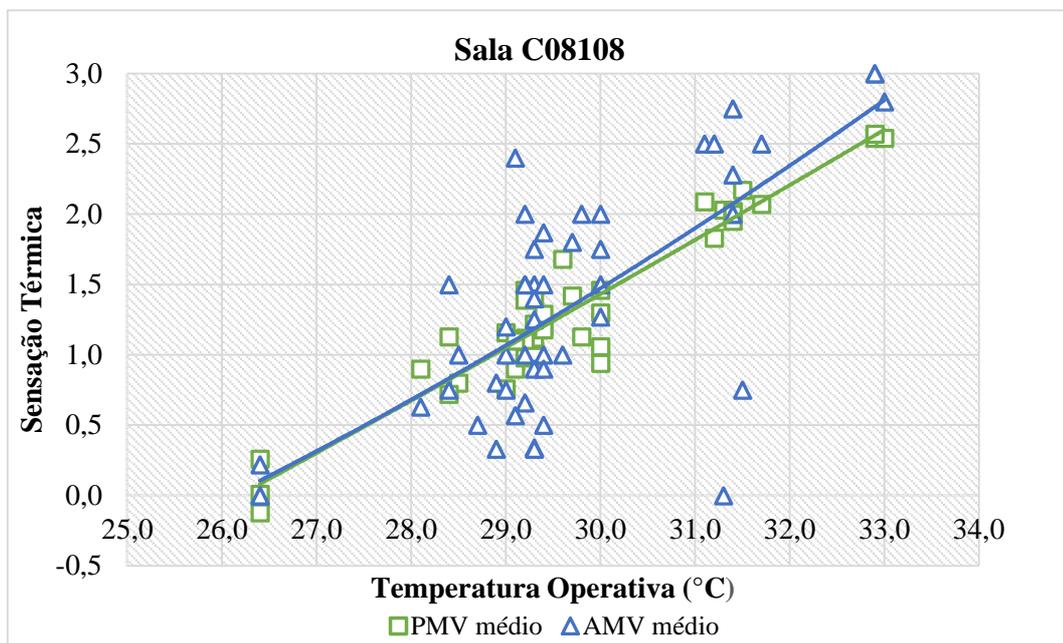


Figura 4.14 - Comparação entre o PMV médio e o AMV médio na sala C08108

Analisando o gráfico das Fig. (4.13) é possível perceber que nas salas com ventilação natural, de acordo com a faixa de temperaturas operativas analisadas, o PMV subestimou o voto de sensação térmica no intervalo de 0 a +2. Este resultado é semelhante ao encontrado

por Loomans *et al.* (2011), que investigaram parâmetros de conforto térmico em salas de aula de escolas primárias na Holanda. Os autores comentam que resultados encontrados para salas de aula sem ar condicionado, de três diferentes escolas, mostram que o PMV analítico, calculado com valores reais (médios) de isolamento das roupas, de metabolismo e de velocidade média do ar, subestima a sensibilidade térmica no intervalo de 0 a +2. Clementes-Croome *et al.* (2012) também comentam em seus estudos, onde os efeitos da ventilação em sala de aula sobre o desempenho dos alunos foram investigados em 8 escolas primárias na Inglaterra, que para votos térmicos distribuídos no lado quente da escala, o índice PMV calculado de acordo com a ISO 7730 sempre subestimou as classificações subjetivas.

Já para a sala com sistema de ventilação mecânica, conforme Fig. (4.14), o PMV parece realmente prever com relativa aproximação o voto médio real (AMV) dos ocupantes, principalmente no intervalo 0 a +1,5 da escala, neste caso correspondente a uma temperatura operativa na faixa de 26 °C a 30 °C.

4.3.4 Análise do conforto pelo modelo adaptativo

Com a finalidade de analisar o conforto térmico das salas avaliadas neste estudo segundo o modelo adaptativo, a Fig. (4.15) apresenta os valores médios de temperatura operativa interna, e os valores médios predominantes de temperatura do ar externo, tomando como base sete dias antes dos dias pontuais de medição.

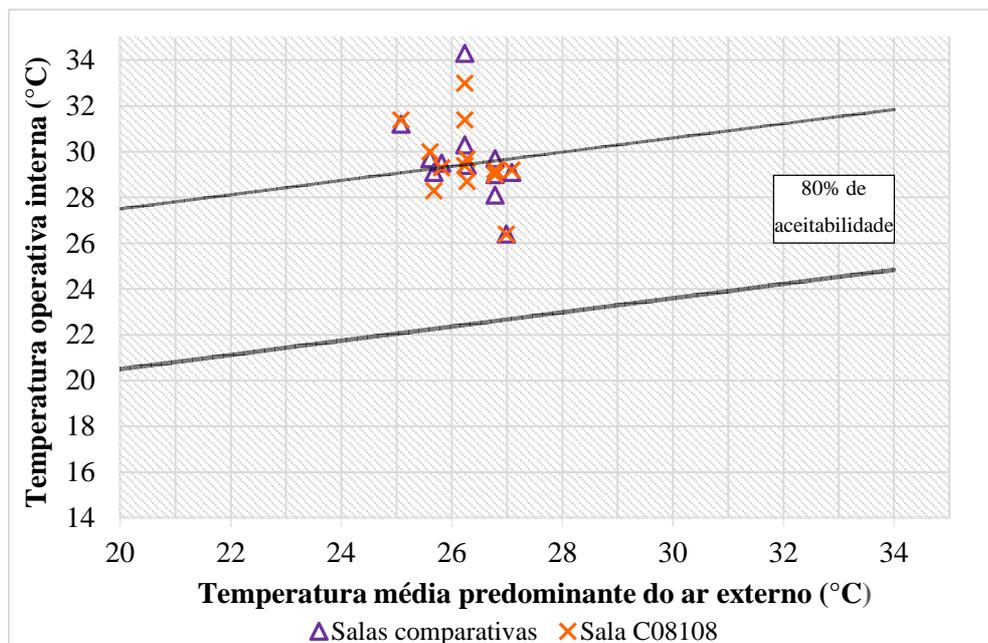


Figura 4.15 - Temperatura operativa interna em função da temperatura média do ar exterior para as salas avaliadas

Ao analisar a Fig. (4.15), que apresenta os valores medidos junto aos limites, superior e inferior de valores aceitáveis de temperatura operativa para ambientes naturalmente condicionados, proposto pela ASHRAE 55/2013, nota-se que os usuários da sala C08108 estavam em condições semelhantes aos usuários das demais salas avaliadas, segundo o modelo proposto. Ambos os locais avaliados, com e sem ventilação mecânica, apresentaram similaridade em relação ao número de dias em que, segundo o modelo adaptativo, ao menos 80% dos usuários apresentariam aceitabilidade térmica em relação ao ambiente. Numa análise mais detalhada, constatou-se que a sala C08108 apresentou um percentual ligeiramente maior em relação a valores dentro da faixa aceitável, 64% a 50%, comparada às demais salas de aula. Com base nestes resultados optou-se por avaliar a aceitabilidade térmica dos usuários de acordo com a pesquisa subjetiva.

4.3.5 Análise da aceitabilidade térmica nas salas avaliadas

Em relação a aceitabilidade térmica dos ambientes durante as medições comparativas, 72,5% dos ocupantes da sala C08108 classificaram o ambiente como “aceitável” e 27,5% como “inaceitável”. Já para as demais salas apenas 40,1% dos ocupantes classificaram o ambiente como “aceitável” e 59,9% como “inaceitável”. Numa análise entre os dias de comparação, para 91,6% das medições realizadas os ocupantes da sala C08108 manifestaram melhores percentuais de aceitabilidade térmica em relação aos ocupantes das demais salas avaliadas.

A Tab. (4.7) resume os dados de aceitabilidade térmica dos usuários nas salas avaliadas, comparando os resultados com o modelo de conforto adaptativo, por meio da faixa admissível de valores de temperatura operativa, e com o modelo analítico por meio do cálculo do PPD. O valor de APD, referente a pesquisa subjetiva e correspondente ao percentual de votos “-3, -2, +2 e +3” da escala sétima, também é apresentado.

Tabela 4.7 - Aceitabilidade térmica e percentual de insatisfeitos nas salas avaliadas

Med.	Data	T	Sala	Temp. média predom externa (°C)	Temp. operativa Limite superior (°C)	Temp. operativa interna (°C)	Aceitab. Pesquisa Subjetiva (%)	APD (%)	PPD (%)
5	20/12/2016	N	C06108	24,26	28,82	29,7	58,33	58,33	41,89
			C08108			30,0	87,50	43,75	29,41
6	22/12/2016	N	C06108	25,67	29,26	29,1	41,67	50,00	32,49
			C08108			28,3	91,67	25,00	21,38
7	03/01/2017	N	C06108	25,08	29,07	31,2	25,00	83,33	74,65
			C08108			31,4	73,33	53,33	80,02
8	06/01/2017	N	C06108	26,98	29,66	26,4	100,00	18,18	5,25
			C08108			26,4	100,00	0,00	5,13
9	09/01/2017	N	C06108	25,81	29,30	29,5	83,33	33,33	46,27
			C08108			29,3	87,50	37,50	30,82
10	21/02/2017	N	C07110	26,78	29,60	28,1	41,94	67,74	11,37
			C08108			29,0	92,00	24,00	30,46
11	23/02/2017	T	C07107	26,78	29,60	29,7	38,46	84,62	26,79
			C08108			29,2	66,67	77,78	33,16
12		N	C07108	26,78	29,60	29,0	46,43	53,57	33,45
			C08108			29,2	62,50	50,00	36,91
13	24/02/2017	N	C08109	27,08	29,69	29,1	72,73	18,18	30,41
			C08108			29,2	86,67	26,67	27,87
14	01/03/2017	N	C07107	26,27	29,44	29,4	25,97	81,48	34,41
			C08108			29,7	45,83	70,83	35,90
15	02/03/2017	T	C05106	26,23	29,43	34,3	10,53	100,00	99,53
			C08108			33,0	9,09	100,00	94,40
16		N	C07108	26,23	29,43	30,3	10,34	93,10	47,00
			C08108			31,4	33,33	100,00	76,00
17	06/03/2017	N	C08108	26,23	29,43	29,4	82,35	23,53	42,51
18	07/03/2017	N	C08108	26,27	29,44	28,7	86,21	17,24	17,30

Na Tab. (4.7) os valores em fundo verde indicam um valor de temperatura operativa interna dentro da faixa admissível, para o dia em questão, pelo modelo do conforto adaptativo, ou seja, onde ao menos 80% dos usuários demonstrariam aceitabilidade térmica com o ambiente. Já os valores com fundo azul indicam a aceitabilidade térmica (real) dos usuários, acima de 80%, verificada por meio da pesquisa subjetiva onde os usuários foram questionados sobre o ambiente térmico ser “aceitável” ou “inaceitável”.

Analisando os valores encontrados percebe-se que nas salas comparativas a aceitabilidade térmica dos ocupantes ficou dentro da faixa proposta (80%) em apenas 16,67%

das medições, sendo que a aceitabilidade prevista pelo método aplicado a ambientes naturalmente condicionados seria de 50%. Cabe ressaltar que durante a medição 9, mesmo com o valor da temperatura operativa interna da sala C06108 não estando dentro da faixa de 80% de aceitabilidade, 83,33% dos usuários manifestaram que o ambiente térmico era aceitável durante a medição. Um fato que pode ter contribuído para este resultado é que 66,67% dos ocupantes neste dia eram do sexo feminino.

Já para a sala com o sistema de ventilação mecânica, a aceitabilidade térmica dos ocupantes ficou dentro da faixa proposta (80%) em 57,14% das medições, sendo que a aceitabilidade prevista pelo método aplicado a ambientes naturalmente condicionados seria de 64%. Durante a medição 5, mesmo com o valor da temperatura operativa interna não estando dentro da faixa de 80% de aceitabilidade, 87,50% dos usuários manifestaram que o ambiente térmico era aceitável durante a medição. Em uma análise mais pontual, verificou-se que neste dia os ventiladores de teto estavam desligados e o sistema de ventilação mecânica proporcionou um índice de vazão de ar externo na sala que correspondeu a 8,8 vezes o valor recomendado. Em termos de ambiente, neste dia houve uma taxa de renovação de 16,7 trocas de ar por hora, em função da configuração dos ventiladores.

É interessante observar também que para a sala C08108 apenas em três medições a aceitabilidade térmica dos usuários ficou com percentual abaixo de 50%, sendo que destas três situações, em duas delas a média de temperatura operativa interna ultrapassou os 30 °C. Para a medição 14, cujo valor $t_o = 29,7$ °C, o percentual de aceitabilidade térmica foi de 45,83%, porém, constatou-se que o índice de vazão de ar externo foi de apenas 2,7. Para a medição 7, mesmo com $t_o = 31,4$ °C a aceitabilidade térmica registrada foi de 73,33% sendo que neste dia o índice de vazão de ar externo foi de 9,3 e em termos de ambiente a taxa de renovação de ar foi de 16,7.

Outro fato relevante em relação aos dados da Tab. (4.6) é que apesar da sala C08108 não apresentar, de maneira geral, índices menores de insatisfação quanto a sensação térmica pelo modelo analítico (PPD), conforme pode ser verificado, os votos reais de insatisfação (APD) mostram que para 66,67% das medições realizadas os usuários da sala com o sistema de ventilação mecânica manifestaram menor insatisfação em relação a sensação térmica e em 75% das medições, menor ou igual insatisfação comparados aos ocupantes das demais salas avaliadas.

Desconsiderando a medição 8 (06/01/2017), os menores índices de insatisfação real (APD) na sala C08108 foram apresentados durante as medições 17 (23,53%) e 18 (17,24%). Levando em consideração as temperaturas médias na sala (t_{bs}) e as taxas de renovação de ar,

observa-se para estes dias, 29,2 °C com 16,7 renovações por hora e 28,2 °C com 9 renovações por hora, respectivamente. Em seus estudos sobre três estratégias de ventilação com seis configurações de exaustão Fong *et al.* (2015), encontraram 0% de insatisfação real (APD) com os ocupantes da sala expostos a 26 °C e 10 renovações de ar por hora e também a 28 °C com 15 renovações de ar por hora, sendo ambas as situações sob ventilação por estrato.

A partir dos resultados encontrados em relação as sensações, preferências e aceitabilidades térmicas dos ocupantes da sala C08108, em comparação aos usuários das demais salas avaliadas, optou-se por analisar os dados provenientes do sistema de ventilação mecânica e verificar de que forma as taxas de renovação de ar durante os dias de medição influenciaram o conforto térmico destes ocupantes.

4.4 Influência da renovação de ar na sala C08108

A Fig. (4.16) apresenta o índice AMV médio em função do índice de vazão de ar externo na sala C08108 durante algumas medições.

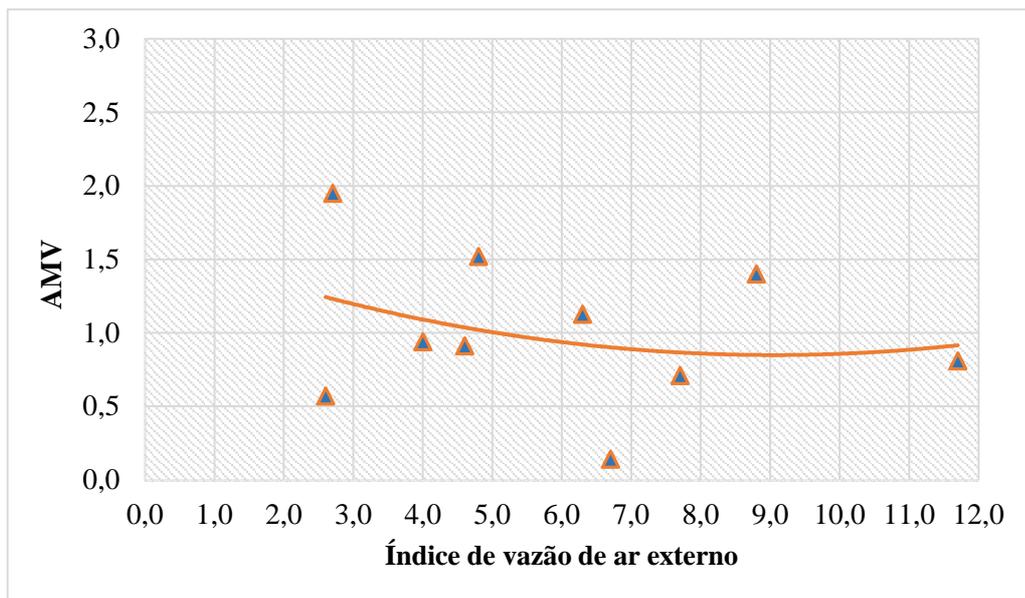


Figura 4.16 - Sensação térmica dos usuários em função do índice de vazão de ar externo para a sala C08108

Analisando o gráfico da Fig. (4.16) é possível perceber uma leve tendência de diminuição nas médias dos votos de sensação térmica (AMV médio) à medida que o índice de vazão de ar externo vai aumentando, consequentemente aumentando a taxa de renovação de ar na sala C08108. Cabe ressaltar que os resultados apresentados no gráfico da Fig. (4.16) representam medições cujas temperaturas operativas corresponderam a faixa de 26,4 °C a

30 °C. Optou-se por analisar esta faixa de temperatura pois, conforme verificado na Fig. (4.10), a partir de 30 °C os índices AMV passaram a ter um comportamento irregular e, de forma geral, os ocupantes da sala C08108 manifestaram condições térmicas semelhantes aos ocupantes das demais salas avaliadas.

Ao analisarmos alguns pontos distantes da curva de tendência podemos encontrar condições importantes relacionadas aos resultados. Durante a medição 8, por exemplo, onde os votos de sensação térmica dos ocupantes resultaram em uma média de 0,14 para um índice de vazão de ar externo de 6,7, a temperatura operativa média registrada na sala foi de 26,4 °C, fato que associado a renovação de ar na sala pode justificar um valor tão próximo da zona de neutralidade térmica. Já durante a medição 6, quando foi registrado $t_o = 28,3$ °C e mesmo para um índice de vazão de ar externo de 11,7 o AMV médio dos ocupantes resultou em 0,81, o que chama a atenção é que neste dia os ventiladores de teto na sala C08108 estavam desligados e a velocidade média do ar, conforme Tab. (B.1) foi de apenas 0,05 m/s, ou seja, pode-se dizer que o ambiente interno não apresentava vento.

Esta condição levou-nos a avaliar as questões relativas à preferência e à aceitabilidade do movimento do ar na sala C08108, de acordo com as pesquisas subjetivas realizadas durante as medições. A Fig. (4.17) apresenta a preferência e a aceitabilidade dos ocupantes em relação ao movimento do ar na sala proposta, em função do índice de vazão de ar externo.

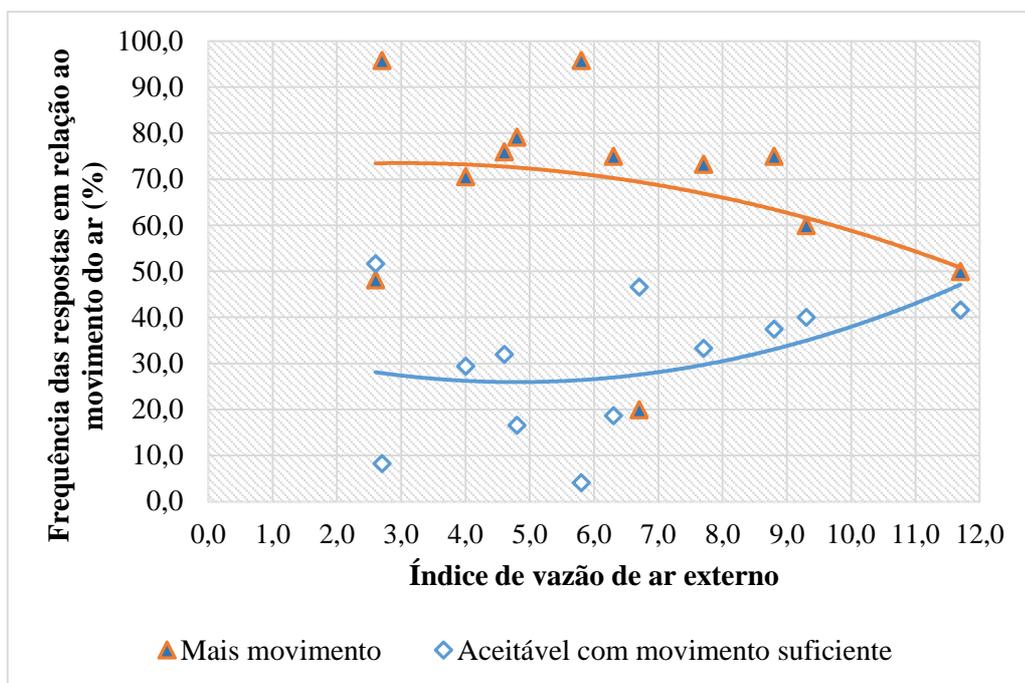


Figura 4.17 - Preferência e aceitabilidade dos ocupantes em relação ao movimento do ar na sala C08108 em função do índice de vazão de ar externo

Analisando o gráfico da Fig. (4.17), percebe-se que o aumento do índice de vazão de ar externo mostra uma tendência de maior aceitabilidade à condição de menor movimento do ar na sala, principalmente para os índices mais elevados. Não foram consideradas as medições 11 e 15, porque analisando pontualmente estes resultados percebe-se que nas medições realizadas durante o período da tarde, os ocupantes dos ambientes avaliados manifestaram, de maneira geral, seus votos e suas respostas sobre forte influência das temperaturas externas, principalmente quando estas excederam os 30 °C, caso das duas medições citadas anteriormente, quando, conforme dados da Tab. (4.6), os valores de temperatura externa (t_{bs}) registrados ficaram numa faixa de 30,5 °C a 35,1 °C.

Analisando os pontos distantes da curva verifica-se que durante a medição 8, quando apenas 20% dos ocupantes da sala C08018 disseram preferir “mais movimento” e 46,6% relataram que o ambiente era “aceitável com movimento suficiente”, a temperatura operativa média registrada na sala foi de 26,4 °C. Já para a medição 18, quando mesmo sob um índice de vazão de ar externo de apenas 2,6, somente 48,2% dos ocupantes disseram preferir “mais movimento” e 51,7% relataram que o ambiente era “aceitável com movimento suficiente”, foi registrado $t_o = 28,7$ °C e a velocidade média do ar na sala, conforme Tab. (B.1), foi de 0,23 m/s, sendo este o segundo maior valor médio registrado na sala C08108 durante as medições. Estes dois fatos agregados podem justificar a proximidade nos percentuais no que diz respeito a preferência e aceitabilidade dos ocupantes em relação ao movimento do ar neste dia.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como essência a análise da influência da renovação de ar no conforto térmico de estudantes universitários. Ao final do experimento, reuniu-se um total de 616 dados referentes à sensação de conforto, à aceitabilidade e à preferência térmica dos ocupantes de salas de aula que configuraram dois ambientes de avaliação e comparação, um constituído apenas de ventilação natural e outro, sala C08108, com um sistema de ventilação mecânica que gerou índices de vazão de ar externo cujos valores ultrapassaram o valor considerado como ideal pela ABNT NBR 16401-3 e, conseqüentemente, proporcionou taxas elevadas de renovação de ar na sala.

De forma geral, para temperaturas operativas com valores entre 26 °C e 31 °C os usuários da sala C08108 manifestaram melhores condições de sensação térmica, comparados aos usuários das demais salas avaliadas. Além disso, para valores de temperatura operativa entre 28 °C e 30 °C não foram observados índices AMV menores que 1,0 nas salas comparativas. Já para a sala com maiores taxas de renovação de ar observou-se diversos resultados com índice AMV abaixo de 1,0 dentro desta mesma faixa de temperatura, sugerindo que os ocupantes deste ambiente estavam sob melhores condições de conforto térmico.

Na comparação entre os índices PMV e AMV médio, percebeu-se que nas salas com ventilação natural, de acordo com a faixa de temperatura operativa analisada, o PMV subestimou o voto de sensação térmica no intervalo de 0 a +2. Já para a sala com sistema de ventilação mecânica, o modelo analítico proposto pela ISO 7730/2005 e pela ASHRAE 55/2013 parece realmente predizer com relativa aproximação a real sensação térmica dos ocupantes, principalmente no intervalo de 0 a +1,5 da escala.

Em relação a aceitabilidade térmica nos dias de avaliação comparativa, 72,5% dos ocupantes da sala C08108 classificaram o ambiente como “aceitável” e 27,5% como “inaceitável”. Já para as demais salas apenas 40% dos ocupantes classificaram o ambiente como “aceitável” e 60% como “inaceitável”. Numa análise com o modelo de conforto adaptativo, a aceitabilidade térmica dos ocupantes das salas com ventilação natural ficou dentro da faixa proposta pela ASHRAE 55/2013 (80%) em pouco mais de 16% das medições, já para a sala com o sistema de ventilação mecânica, a aceitabilidade térmica dos ocupantes ficou dentro da faixa proposta (80%) em 57% das medições, o que demonstra melhor aplicabilidade deste modelo na sala com índices mais elevados de vazão de ar externo para os meses em que ocorreu o experimento.

O estudo também apontou, por meio de análise da sensação térmica dos usuários em função do índice de vazão de ar externo para a sala C08108, uma tendência de diminuição dos valores médios de AMV à medida que o índice de vazão de ar externo foi aumentando, conseqüentemente também aumentando a taxa de renovação de ar na sala, de forma que este aspecto somado a outras ações adaptativas observadas durante o experimento, como abertura de portas e janelas, baixos índices de clo dos ocupantes e o aumento da velocidade do ar proporcionaram melhores condições de conforto térmico na sala com o sistema de ventilação mecânica em relação as demais salas avaliadas.

De maneira geral, as respostas dos usuários das salas comparativas foram piores que o previsto tanto para o modelo estático quanto para o modelo adaptativo e os resultados mostram que o aumento da taxa de renovação de ar em salas de aula configura-se como uma boa alternativa para melhorar a sensação térmica dos ocupantes em climas quentes e úmidos. Essa constatação confirma que sistemas de ventilação mecânica, associados a oportunidades adaptativas aos ocupantes, permitem, para temperaturas operativas internas de até 30 °C, propiciar a racionalização do uso de sistemas de condicionamento artificial, reduzindo assim o consumo de energia elétrica em edificações através do incremento da vazão de ar exterior.

5.1 Limitações do trabalho

As principais limitações encontradas durante a realização desta pesquisa estão relacionadas ao número de experimentos e à faixa de temperaturas cujas análises foram realizadas em função dos registros das medições comparativas, ou seja, quando ambos os tipos de ambiente eram analisados. Durante as análises comparativas é possível observar, por exemplo, a inexistência de dados para valores de temperatura operativa entre 27 °C e 28 °C, condição que poderia corroborar os resultados encontrados em relação a influência da renovação de ar no conforto térmico.

Outras limitações também aconteceram em relação as medições propriamente ditas, principalmente no que se refere ao uso dos ventiladores de teto e a medição de velocidade média do ar nas salas avaliadas. Devido à alta sensibilidade do anemômetro utilizado durante as medições e também a condições de pouco ou nenhum vento para algumas zonas avaliadas ou ainda valores irregulares de velocidade devido a ação dos ventiladores de teto, por vezes a determinação de uma média dos valores de velocidade do ar se tornou fatigante.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

Durante a realização deste trabalho observaram-se algumas ramificações e limitações referentes ao tema e que podem ser exploradas para uma maior compreensão da influência da renovação de ar no conforto térmico de estudantes em climas quentes e úmidos. A seguir, são apresentadas sugestões de estudos que podem ser desenvolvidos de maneira a acrescentar as análises realizadas:

- Maior número de experimentos de campo, avaliando também a influência da renovação de ar em dias com temperaturas amenas e até em dias de baixa temperatura;
- Propor um ambiente cujo sistema de ventilação mecânica possa proporcionar não apenas renovação de ar, mas também aumento de velocidade do ar, de forma que os valores médios possam ficar acima de 0,2 m/s;
- Avaliação econômica da sala proposta com o sistema de ventilação mecânica;
- Aprofundar-se na questão da influência da renovação do ar no conforto térmico de estudantes e inclusive de que forma esse aspecto pode interferir no desempenho durante a aprendizagem.

REFERÊNCIAS

- ACKERLY, K.; BRAGER, G. Window signaling systems: control strategies and occupant behavior. **Building Research & Information**, v. 41, n. 3, p. 342-360, 2013.
- ANSI/AMCA 210 - 1999 (ASHRAE STANDARD 51 - 1999). **Laboratory Method of Testing Fans for Aerodynamic Performance Rating**. Air Movement and Control Association International, Inc. and American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., Illinois, USA, 2000.
- ASHRAE STANDARD 55 - 1992. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, USA, 1992.
- ASHRAE STANDARD 55 - 2013. **Thermal Environmental Conditions for Human occupancy**. Atlanta, Georgia: American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2013
- ASHRAE, **ASHRAE Handbook – Fundamentals** Chapter 8: Thermal Comfort, American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 2005.
- ASHRAE, **ASHRAE Handbook – Fundamentals** Chapter 9: Thermal Comfort, American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 16401-2**: Instalações de ar condicionado – Sistemas centrais e unitários Parte 2: Parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 16401-3**: Instalações de ar condicionado – Sistemas centrais e unitários Parte 3: Qualidade do ar interior. Rio de Janeiro, 2008.
- BARBHUIYA, Saadia; BARBHUIYA, Salim. Thermal comfort and energy consumption in a UK educational building. **Building and Environment**, v.68, p. 1-11, 2013.
- BATIZ, Eduardo Concepción; et al. Avaliação do conforto térmico no aprendizado: estudo de caso sobre a influência na atenção e memória. **Produção**, v.9, n.3, p.477-488, 2009.
- BECKER, Rachel; GOLDBERGER, Itamar; PACIUK, Monica. Improving energy performance of school buildings while ensuring indoor air quality ventilation. **Building and Environment**, v.42, p.3261-3276, 2007.
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 3523, de 28 de agosto de 1998**. Aprova o Regulamento Técnico contendo medidas básicas referentes aos procedimentos de verificação visual do estado de limpeza, remoção de sujidades por métodos físicos e manutenção do estado de integridade e eficiência de todos os componentes dos sistemas de climatização, para garantir a Qualidade do Ar de Interiores e prevenção de riscos à saúde dos ocupantes de

ambientes climatizados. Disponível em:

<http://bvsmis.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/1998/prt3523_28_08_1998.html>. Acesso em: 16 abr. 2017.

BRASIL. **Resolução RE nº 9, de 16 de janeiro de 2003**. Determina a publicação de Orientação Técnica elaborada por Grupo Técnico Assessor, sobre Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior, em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo. Disponível em:

<http://portal.anvisa.gov.br/documents/33880/2568070/RE_09_2003.pdf/f4af80d4-8516-4f9c-a745-cc8b4dc15727>. Acesso em: 16 jul. 2016.

CÂNDIDO, C. **Indoor air movement acceptability and thermal comfort in hot-humid climates**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010. 180p. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC, 2010. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/teses/TESE_Christhina_Maria_Candido.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2017

CÂNDIDO, Christhina et al. Air movement acceptability limits and thermal comfort in Brazil's hot humid climate zone. **Building and Environment**, v.45, p.222-229, 2010.

CÂNDIDO, Christhina; DE DEAR, Richard; LAMBERTS, Roberto. Combined thermal acceptability and air movement assessments in a hot humid climate. **Building and Environment**, v.46, p.379-385, 2011

CÂNDIDO, Christhina; DE DEAR, Richard; OHBA, Masaaki. Effects of artificial induced heat acclimatization on subjects' thermal and air movement preferences. **Building and Environment**, v.49, p.251-258, 2012.

ÇENGEL, Yunus A., BOLES, Michel A. **Termodinâmica**, tradução: Paulo Maurício Costa Gomes; revisão técnica: Antônio Pertence Júnior - 7.ed. Porto Alegre: AMGH, 2013, 1018p.

CLEMENTS-CROOME, D.J. et al. Ventilation rates in schools and pupils' performance. **Building and Environment**, v.48, p.215-223, 2012.

CONCEIÇÃO, Eusébio Z.E. et al. Evaluation of comfort level in desks equipped with two personalized ventilation systems in slightly warm environments. **Building and Environment**, v.45, p.601-609, 2010.

CONFORTO. In: MICHAELIS: moderno dicionário. São Paulo: Melhoramentos, 2015. Disponível em: <<http://www.michaelis.com.br/busca?id=d1M4>>. Acesso em: 26 mai. 2016

CORGNATI, Stefano Paolo; FILIPPI, Maco; VIAZZO, Sara. Perception of the thermal environment in high school and university classrooms: subjective preferences and thermal comfort. **Building and Environment**, v.42, p.951-959, 2007.

COUTINHO FILHO, Erivaldo Fernandes et al. Avaliação do conforto térmico ambiental em uma escola municipal de João Pessoa. In: ECONTRO DE EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA. DESAFIOS DA INDISSOCIABILIDADE ENTRE ENSINO E EXTENSÃO, 9. 2007, João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 2007. Disponível em: <<http://www.prac.ufpb.br/anais/IXEnex/extensao/documentos/anais/5.MEIOAMBIENTE/5C TDEPPEX01.pdf>>. Acesso em: 07 jan. 2016

DE DEAR, R. J. Adaptive comfort applications in Australia and impacts on building energy consumption. In: PROCEEDINGS OF THE 6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDOOR AIR QUALITY, VENTILATION AND ENERGY CONSERVATION IN BUILDINGS. Anais...Sendai: Japan, 2007.

DE DEAR, R.J.; BRAGER, G.S. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. **ASHRAE Technical Data Bulletin**, v.14, n.1, p.27-49, 1998.

DE DEAR, Richard J.; BRAGER, Gail S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. **Energy and Buildings**, v.34, n.6, p.549 561, 2002.

DE VECCHI, Renata. **Avaliação de conforto térmico em edificações comerciais que operam sob sistemas mistos de condicionamento ambiental em clima temperado e úmido**. 2015. 237p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2015. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/teses/Tese_VersaoFinal_Renata%20De%20Vecchi.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2017

DE VECCHI, Renata. **Condições de conforto térmico e aceitabilidade da velocidade do ar em salas de aula com ventiladores de teto para o clima de Florianópolis/SC**. 2011. 142p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2011. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/dissertacoes/DISSERTACAO_Renata_De_Vecchi.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2017

ELBAYOUMI, Maher et al. Influence of seasonal variation on thermal comfort and ventilation rates in Gaza Strip climate. **Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences**, v.38, p.197-208, 2014.

ELETROBRAS; PROCEL. **Relatório de resultados do Procel 2014 - ano base 2013**. Rio de Janeiro, 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica**, ano X, n.111. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/Resenha%20Mensal%20do%20Mercado%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%20-%20Novembro%202016.pdf>>. Acesso em: 18 jan. 2017

FONG, M.L. et al. Acceptance of thermal conditions and energy use of three ventilation strategies with six exhaust configurations for the classroom. **Building and Environment**, v.94, p.606-619, 2015.

FONG, M.L. et al. Evaluation of thermal comfort conditions in a classroom with three ventilations methods. **Indoor Air**, v.21, p.231-239, 2011.

FREITAS, Ruskin Marinho de; AZERÊDO, Jaucele de Fátima A. A disciplina conforto ambiental: uma ferramenta prática na concepção de projetos de arquitetura, de urbanismo e de paisagismo. **Cadernos do PROARQ**, n.20, 2013.

FROTA, A. B. e SCHIFFER, S. R. **Manual do conforto térmico**. 7ª Edição - São Paulo: Studio Nobel, 2003.

GONÇALVES, Joana Carla Soares. Desempenho das edificações depende do projeto de arquitetura. **Portal EA**, 2016. Disponível em: <<http://www.engenhariae arquitetura.com.br/noticias/1349/Desempenho-das-edificacoes-depende-do-projeto-de-arquitetura.aspx>>. Acesso em: 20 jan. 2017.

HONNEKERI, Anoop et al. Use of adaptive actions and thermal comfort in a naturally ventilated office. *IndoorAir*. UC Berkeley: **Center for the Built Environment**. 2014. Disponível em: <<http://escholarship.org/uc/item/37r4w5zs>>. Acesso em: 23 jan 2017.

HUMPHREYS, M.; NICOL, J.F. Understanding the adaptive approach to thermal comfort. **ASHRAE Technical Data Bulletin**, v.14, n.1, p.1-14, 1998.

INTERNACIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 7730**: Moderate thermal environments – Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. Geneva, 1994

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 10551**: Ergonomics of the Thermal Environment – Assessment of the influence of the Thermal Environment Using Subjective Judgment Scales. Geneva, 1995.

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

JURADO Sonia R.; BANKOFF Antônia D.P.; SANCHEZ, Andrea. Indoor air quality in brazilian universities. **International Journal of Environment Research and Public Health**, v.11, p.7081-7093, 2014.

KRÜGER, Eduardo L.; ZANNIN, Paulo H.T. Acoustic, thermal and luminous comfort in classrooms. **Building and Environment**, v.39, p.1055-1063, 2004.

LAMBERTS, Roberto; XAVIER, Antônio Augusto; GOULART, Solange; DE VECCHI, Renata. **Conforto e stress térmico**. Santa Catarina, 2016. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/Apostila%20Conforto%20T%C3%A9rmico_2016.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2016.

LIAN, Zhiwei et al. Investigation on thermal comfort and energy conservation of local ventilation. **HVAC&R Research**, v. 19, n.5, p.584-592, 2013.

LIN, Zhang et al. Stratum ventilation - A potential solution to elevated indoor temperatures. **Building and Environment**, v. 44, n.11, p.2256-2269, 2009.

LIN, Zhang; CHOW, T.T.; TSANG, C.F. Stratum ventilation? A conceptual introduction. In: **PROCEEDINGS OF THE 10TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDOOR AIR QUALITY AND CLIMATE**, Beijing, China, 2005. Disponível em: <<https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-33847774918&origin=inward&txGid=BBB0824913876FAEAC25F3219AA6EA78.wsnAw8kcdt7IPYLO0V48gA%3a2>>. Acesso em 27 jan. 2017

LOOMANS, Marcel G.L.C. et al. Adaptive thermal comfort in primary school classrooms: Creating and validating PMV-based comfort charts. **Building and Environment**, v.46, p.2454-2461, 2011.

MALHOTRA, Naresch K. **Pesquisa de Marketing: uma orientação aplicada**. 6 ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2012.

MISHRA, Asit Kumar; RAMGOPAL, Maddali. A comparison of student performance between conditioned and naturally ventilated classrooms. **Building and Environment**, v.84, p.181-188, 2015.

MISHRA, Asit Kumar; RAMGOPAL, Maddali. A thermal comfort field study of naturally ventilated classrooms in Kharagpur, India. **Building and Environment**, v.92, p.396-406, 2015.

MISHRA, Asit Kumar; RAMGOPAL, Maddali. Thermal comfort field study in undergraduate laboratories – An analysis of occupant perceptions. **Building and Environment**, v.76, p.62-72, 2014.

MODESTE, K.N.; TCHINDA, R.; RICCIARDI, P. Thermal comfort and air movement preference in some classrooms in Cameroun. **Revue des Energies Renouvelables**, v.17, n.2, p.263-278, 2014.

MOUJALLE, Bassam; CANTIN, Richard; GUARRACINO, Gérard. Comparison of thermal comfort algorithms in naturally ventilated office buildings. **Energy and Buildings**, v.40, n.12, p.2215-2223, 2008.

MUMOVIC, D. et al. Winter indoor air quality, thermal comfort and acoustic performance of newly built secondary schools in England. **Building and Environment**, v.44, p.1466-1477, 2008.

NICOL, J.F.; HUMPHREYS, M.A. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. **Energy and Buildings**, v.34, p.563-572, 2002.

NR, Norma Regulamentadora Ministério do Trabalho e Emprego. **NR-15** - Atividades e operações insalubres. 2009.

NR, Norma Regulamentadora Ministério do Trabalho e Emprego. **NR-17** - Ergonomia. 2009.

OLIVEIRA, Celia Simão de. Conforto e bem-estar enquanto conceitos em uso em enfermagem. **Pensar Enfermagem**, v.17, n.2, p.2-8, 2013.

PASUT, Wilmer et al. Enable energy-efficient approaches to thermal comfort using room air motion. **Building and Environment**, v.79, p.13-19, 2014.

RUPP, Ricardo Forgiarini; VÁSQUEZ, Natalia Giraldo; LAMBERTS, Roberto. A review of human thermal comfort in the built environment. **Energy and Buildings**, v.105, p.178-205, 2015.

S&P BRASIL VENTILAÇÃO LTDA. **Folheto gama TD Silent**. Porto Alegre, 2013.
Disponível em:

<http://www.solerpalau.com.br/public/files/downloads/c22acpt_folleto_td_silent_brasil_07_13_web_menor.pdf>. Acesso em 28 jan. 2017

SARBU, Ioan; PACURAR, Cristian. Experimental and numerical research to assess indoor environment quality and schoolwork performance in university classrooms. **Building and Environment**, v.93, p.141-154, 2015.

SCHIAVON, Stefano; MELIKOV, Arsen Krikor. Introduction of a cooling-fan efficiency index. **HVAC&R Research**, v. 15, n.6, p.1121-1138, 2009.

SCHIAVON, Stefano; MELIKOV, Energy saving and improved comfort by increased air movement. **Energy and Buildings**, v. 40, p.1954-1960, 2008.

SHENDELL, D.G. et al. Associations between classrooms CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho. **Indoor Air**, v.14, p.333-341, 2004.

SIMONE, Angela et al. Thermal comfort assessment of Danish occupants exposed to warm environments and preferred local air movement. In: PROCEEDINGS OF INDOOR AIR 2014. INTERNATIONAL SOCIETY OF INDOOR AIR QUALITY AND CLIMATE. University of Hong Kong. Hong Kong, 2014. Disponível em: <[http://orbit.dtu.dk/en/publications/thermal-comfort-assessment-of-danish-occupants-exposed-to-warm-environments-and-preferred-local-air-movement\(a8452dbd-ced0-4975-9cd6-4905f8760215\).html](http://orbit.dtu.dk/en/publications/thermal-comfort-assessment-of-danish-occupants-exposed-to-warm-environments-and-preferred-local-air-movement(a8452dbd-ced0-4975-9cd6-4905f8760215).html)>. Acesso em 24 jan. 2017

SMEDJE, G.; MATTSSON, M.; WÄLINDER, R. Comparing mixing and displacement ventilation in classrooms: pupils' perception and health. **Indoor Air**, v.21, p.454-461, 2011.

STEFANIZZI, Pietro; NICO, Maria Anna; LIUZZI, Stefania. Evaluation of thermal comfort in university classrooms through objective approach and subjective preference analysis. **Applied Ergonomics**, v.48, p.111-120, 2015.

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS. **Mapa da Unisinos**. São Leopoldo, 2017. Disponível em: <http://www.unisinos.br/mapa/pdf/unisinos_mapa_campus.pdf>. Acesso em 27 jan. 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - CENTRO TECNOLÓGICO - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL. **Apostila do curso básico do programa Energy Plus**. Santa Catarina, 2009. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ECV4202_Apostila_EnergyPlus_0.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2017.

WARGOCKI P., WYON, D.P. The effects of moderately raised classroom temperatures and classroom ventilation rate on the performance of schoolwork by children. **HVAC&R Research**, v.13, n.2, p.193-220, 2007.

YANG, En-Hua et al. Comparing mixing and displacement ventilation in tutorial rooms: Students' thermal comfort, sick building syndromes, and short-term performance. **Building and Environment**, v.102, p.128-137, 2016.

YANG, W.; ZHANG, G. Air movement preferences observed in naturally ventilated buildings in humid subtropical climate zone in China. **International Journal of Biometeorology**, v.53, p.563-573, 2009.

YATIM, Siti Rohana Mohd et al. Thermal comfort in air-conditioned learning environment. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM & EXHIBITION IN SUSTAINABLE ENERGY & ENVIRONMENT, 3., 2011, Melaka. Estados Unidos: IEEE, 2011. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5977088&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F5955057%2F5977077%2F05977088.pdf%3Farnumber%3D5977088>>. Acesso em: 06 jan. 2016

ZHANG, Hui; ARENS, Edward; ZHAI, Yongchao. A review of the corrective power of personal comfort systems in non-neutral ambient environments. **Building and Environment**, v.91, p.15-41, 2015.

ZHANG, Yufeng. et al. Human comfort and perceived air quality in warm and humid environments with ceiling fans. **Building and Environment**, v.90, p.178-185, 2015.

ZHU, Yingxin. et al. A study about the demand for air movement in warm environment. **Building and Environment**, v.61, p.27-33, 2013.



APÊNDICE A

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

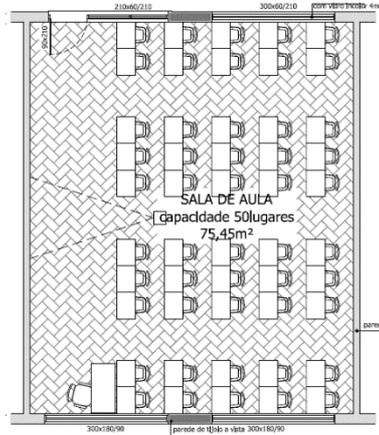
Pesquisa para análise subjetiva do conforto térmico na sala _____

Data:	Hora:		
1. Registre os seguintes dados pessoais:			
Sexo: <input type="checkbox"/> Feminino <input type="checkbox"/> Masculino	Idade:		
Peso:	Altura:		
Alimentação (na hora anterior a pesquisa): () S () N			
Alguma atividade física (na hora anterior a pesquisa)? () S () N			
Saúde: normal ou febril (descreva):			
2. Qual é a sua sensação térmica neste momento? (Assinale a alternativa mais apropriada)			
<input type="checkbox"/> Com muito calor			
<input type="checkbox"/> Com calor			
<input type="checkbox"/> Levemente com calor			
<input type="checkbox"/> Neutro			
<input type="checkbox"/> Levemente com frio			
<input type="checkbox"/> Com frio			
<input type="checkbox"/> Com muito frio			
3. Você preferiria estar:			
<input type="checkbox"/> Mais aquecido	<input type="checkbox"/> Assim mesmo	<input type="checkbox"/> Mais resfriado	
4. Para você este ambiente térmico é:			
<input type="checkbox"/> Aceitável	<input type="checkbox"/> Inaceitável		
5. Como você se sente com relação ao movimento do ar neste momento? (Assinale apenas uma alternativa, considerando a aceitabilidade ou não da velocidade do ar)			
<input type="checkbox"/> Inaceitável com pouco movimento do ar			
<input type="checkbox"/> Inaceitável com muito movimento do ar			
<input type="checkbox"/> Aceitável com pouco movimento do ar			
<input type="checkbox"/> Aceitável com movimento do ar suficiente			
<input type="checkbox"/> Aceitável com muito movimento do ar			
6. Considerando sua resposta anterior, qual a sua preferência em relação ao movimento do ar neste momento?			
<input type="checkbox"/> Mais movimento do ar	<input type="checkbox"/> Não mudar	<input type="checkbox"/> Menos movimento do ar	
7. Como você avalia (percebe) a qualidade do ar neste momento?			
<input type="checkbox"/> Claramente aceitável	<input type="checkbox"/> Apenas aceitável	<input type="checkbox"/> Apenas inaceitável	<input type="checkbox"/> Claramente inaceitável

8. Para você o ar neste momento está:

- | | | | |
|------------------------------------|--|--|----------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Agradável | <input type="checkbox"/> Levemente agradável | <input type="checkbox"/> Levemente abafado | <input type="checkbox"/> Abafado |
|------------------------------------|--|--|----------------------------------|

9. Marque com um "X" o local onde você está sentado neste momento:



10. Utilizando a relação abaixo, assinale cada item de roupa que você está usando agora:

- | | | |
|---|--|---|
| <input type="checkbox"/> Calcinha + Sutiã | <input type="checkbox"/> Botas | <input type="checkbox"/> Camisa flanela longa |
| <input type="checkbox"/> Cueca | <input type="checkbox"/> Shorts/Bermuda | <input type="checkbox"/> Camisa social curta |
| <input type="checkbox"/> Camiseta | <input type="checkbox"/> Shorts comprido | <input type="checkbox"/> Camisa social longa |
| <input type="checkbox"/> Meias soquete | <input type="checkbox"/> Saia fina | <input type="checkbox"/> Blusa sem mangas |
| <input type="checkbox"/> Meia calça fina/Meias 7/8 | <input type="checkbox"/> Saia grossa | <input type="checkbox"/> Blusa manga curta |
| <input type="checkbox"/> Meias médias (algodão) | <input type="checkbox"/> Calça jeans | <input type="checkbox"/> Vestido fino s/ mangas |
| <input type="checkbox"/> Meias compridas (algodão) | <input type="checkbox"/> Calça social | <input type="checkbox"/> Vestido curto algodão |
| <input type="checkbox"/> Sandálias/Chinelos | <input type="checkbox"/> Calça moletom | <input type="checkbox"/> Jaqueta ou Paletó fino |
| <input type="checkbox"/> Tênis/Sapatênis/Sapatos | <input type="checkbox"/> Calça legging | <input type="checkbox"/> Blusão (suéter) fino |
| <input type="checkbox"/> Sapatos semiabertos (femin.) | <input type="checkbox"/> Camisa manga curta (polo) | <input type="checkbox"/> Moletom manga longa |
| <input type="checkbox"/> Outros. Especifique: | | |

11. Qual o seu nível de atividade neste momento? (assinale a opção mais apropriada)

- | |
|--|
| <input type="checkbox"/> Sentado, atividade leve (relaxado, lendo) |
| <input type="checkbox"/> Sentado, atividade moderada (digitando, arquivando) |
| <input type="checkbox"/> Em pé, relaxado |
| <input type="checkbox"/> Atividade leve em pé |
| <input type="checkbox"/> Atividade moderada em pé |
| <input type="checkbox"/> Outra. Especifique: |

12. Dentre as opções abaixo, quais estão disponíveis para o ajuste/controlado pessoal da temperatura neste momento?

- | | | |
|--|--|---|
| <input type="checkbox"/> Cortinas ou persianas | <input type="checkbox"/> Ar condicionado | <input type="checkbox"/> Aquecedor Portátil |
| <input type="checkbox"/> Porta para interior | <input type="checkbox"/> Porta para exterior | <input type="checkbox"/> Ventilador de teto |
| <input type="checkbox"/> Ventilador portátil | <input type="checkbox"/> Janelas operáveis | <input type="checkbox"/> Termostato |

SUA OPINIÃO É MUITO IMPORTANTE PARA ESTA PESQUISA, OBRIGADO!

APÊNDICE B

Tabela de caracterização das variáveis ambientais

A Tab. (B.1) apresenta os valores de temperatura média do ar, temperatura radiante média, temperatura operativa, velocidade média do ar e umidade relativa do ar média encontrados em cada sala avaliada.

Tabela B. 1 - Caracterização das variáveis ambientais durante as medições

Medição	Data	Turno	Sala	Temperatura média do ar (°C)	Temperatura radiante média (°C)	Temperatura Operativa (°C)	Velocidade média do ar (m/s)	Umidade relativa do ar média (%)
1	18/08/2016	Noite	C06102	19,0	20,2	19,6	0,06	50,9
			C06104	17,1	20,0	18,5	0,10	52,7
2	22/08/2016	Manhã	C06109	15,2	15,4	15,3	0,01	75,2
			C06112	14,8	15,3	15,0	0,00	74,4
3	30/09/2016	Noite	C06111	23,6	24,3	23,9	0,02	62,6
4	25/11/2016	Noite	C05105	27,5	28,7	28,0	0,28	64,8
5	20/12/2016	Noite	C06108	29,5	30,0	29,7	0,08	49,8
			C08108	29,5	30,4	30,0	0,14	50,3
6	22/12/2016	Noite	C06108	28,7	29,5	29,1	0,10	66,0
			C08108	27,7	28,8	28,3	0,05	64,1
7	03/01/2017	Noite	C06108	30,7	31,9	31,2	0,21	71,4
			C08108	31,0	31,8	31,4	0,14	73,2
8	06/01/2017	Noite	C06108	25,7	27,1	26,4	0,13	67,5
			C08108	25,7	27,0	26,4	0,14	67,8
9	09/01/2017	Noite	C06108	29,2	29,8	29,5	0,15	71,2
			C08108	28,6	29,9	29,3	0,11	70,3
10	21/02/2017	Noite	C07110	27,6	28,9	28,1	0,23	72,9
			C08108	28,6	29,4	29,0	0,15	73,6
11	23/02/2017	Tarde	C07107	29,6	29,7	29,7	0,27	60,0
			C08108	29,0	29,5	29,2	0,11	64,4
12		Noite	C07108	28,6	29,4	29,0	0,17	68,2
			C08108	28,6	29,7	29,2	0,18	67,4
13	24/02/2017	Noite	C08109	28,4	29,8	29,1	0,16	67,1
			C08108	28,7	29,7	29,2	0,20	67,4
14	01/03/2017	Noite	C07107	29,2	29,7	29,4	0,18	72,2
			C08108	29,2	30,3	29,7	0,25	72,1
15	02/03/2017	Tarde	C05106	34,2	34,4	34,3	0,29	55,0
			C08108	32,8	33,2	33,0	0,14	52,6
16		Noite	C07108	30,1	30,6	30,3	0,19	63,2
			C08108	31,0	31,8	31,4	0,17	61,1
17	06/03/2017	Tarde	C08108	29,2	29,5	29,4	0,12	69,4
18	07/03/2017	Noite	C08108	28,2	29,4	28,7	0,23	69,9

APÊNDICE C

Formulário para registro das variáveis ambientais durante as medições

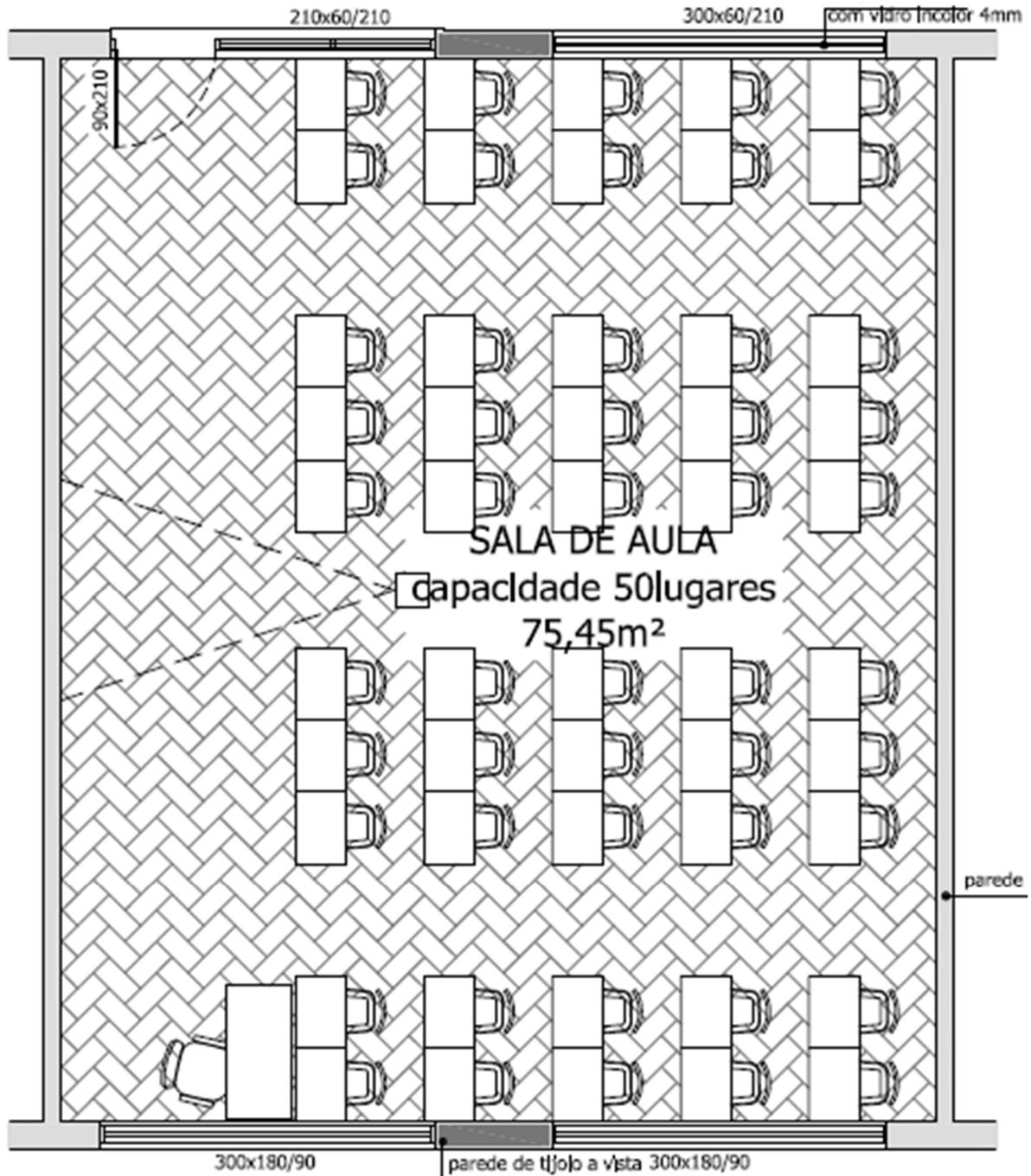
Localização	Alturas (m)	t_g (°C)	t_{ar} (°C)	Var (m/s)
A	1,7m	X		
	1,1m			
	0,6m		X	X
	0,1m	X		
B	1,7m	X		
	1,1m			
	0,6m		X	X
	0,1m	X		
C	1,7m	X		
	1,1m			
	0,6m		X	X
	0,1m	X		
D	1,7m	X		
	1,1m			
	0,6m		X	X
	0,1m	X		
E	1,7m	X		
	1,1m			
	0,6m		X	X
	0,1m	X		

NBR 16401-2

Data		<p>6.2.2 - As medições de temperatura de globo e de assimetria da temperatura radiante devem ser feitas a 0,6m do piso para pessoas sentadas e a 1,1m do piso para pessoas de pé.</p> <p>6.2.3 - As medições de temperatura e de velocidade média devem ser feitas a 0,1m e 1,1m do piso para pessoas sentadas e a 1,7m do piso para pessoas em movimento.</p> <p>6.2.4 - As medições de umidade relativa devem ser feitas em quatro medições sucessivas com intervalos de 5min em um ponto representativo de cada zona ocupada.</p>
Sala		
Hora		
t_{ext} (°C)		
U_{rel} (%)		

APÊNDICE D

Planta-baixa para identificação das zonas na sala avaliada e formulário para registro dos valores de umidade relativa do ar



UMIDADE RELATIVA DO AR - U_r (%)

	A	B	C	D	E
1					
2					
3					
4					