

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

GABRIEL CELLIGOI

**INFLUÊNCIA DE JANELAS NO CONFORTO AMBIENTAL DE UMA
CÂMARA BIOCLIMÁTICA DE BAIXO CUSTO**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2020

GABRIEL CELLIGOI

**INFLUÊNCIA DE JANELAS NO CONFORTO AMBIENTAL DE UMA
CÂMARA BIOCLIMÁTICA DE BAIXO CUSTO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Departamento Acadêmico de Construção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Área de Concentração: Construção Civil
Linha de Pesquisa: Gestão e Sustentabilidade da Construção

Orientador: Prof. Dr. Eduardo L. Krüger

CURITIBA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Celligoi, Gabriel

Influência de janelas no conforto ambiental de uma câmara bioclimática de baixo custo [recurso eletrônico] / Gabriel Celligoi. -- 2020.

1 arquivo texto (121 f.): PDF; 4,37 MB.

Modo de acesso: World Wide Web.

Título extraído da tela de título (visualizado em 03 ago. 2020).

Texto em português com resumo em inglês.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Curitiba, 2020.

Bibliografia: f. 110-121.

1. Engenharia civil - Dissertações. 2. Janelas. 3. Energia - Consumo. 4. Conforto térmico. 5. Bioclimatologia - Arquitetura. I. Krüger, Eduardo, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, coorient. III. Título.

CDD: Ed. 23 -- 624

Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba

Bibliotecária: Lucia Ferreira Littiere - CRB 9/1271

Aluna de Biblioteconomia: Josiane Mangueira



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 199

A Dissertação de Mestrado intitulada: **Influência de janelas no conforto ambiental de uma câmara bioclimática de baixo custo**, defendida em sessão pública pelo Candidato **Gabriel Celligoi Rodrigues**, no dia 27 de maio de 2020, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Meio Ambiente, linha de pesquisa: Sustentabilidade, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA:

Prof^ª. Dr^ª. Karina Querne de Carvalho - Presidente - UTFPR

Prof. Dr. Rodrigo Eduardo Catai - UTFPR

Prof^ª. Dr^ª. Cassia Maria Lie Ugaya - UTFPR

Prof^ª. Dr^ª. Raquel Diniz Oliveira - CEFET-MG

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, **27 de maio de 2020.**

Para Renata, Davi e Júlia.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de prestar meus sinceros agradecimentos em especial ao meu orientador, Professor Dr. Eduardo Krüger, pela oportunidade de realizar este trabalho assim como por toda a colaboração, envolvimento, amizade e ensinamentos durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos membros da banca examinadora, Professora Dr^a Raquel Diniz Oliveira, Professora Dr^a. Cássia Maria Lie Ugaya e Professor Dr. Rodrigo Eduardo Catai, assim como ao professor Dr. Eduardo Manuel González Cruz, por seus pertinentes apontamentos que contribuíram para a melhoria deste trabalho.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e à sua coordenadora, Professora Dr^a. Karina Querne de Carvalho, pelo apoio à pesquisa.

À equipe de manutenção da sede Ecoville do *campus* Curitiba da UTFPR, à Balbinot Esquadrias e ao eletricista Gilmar Silveira por realizarem os serviços de infraestrutura necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do GT CBBC: Cíntia Tamura, Clarisse Di Núbila, Daniel Trento, Daniele Ribeiro, Deize da Silva, Eduardo Schlemm, Jéssica Romanelli, Livia Yu Iwamura Trevisan, Patricia Drach, Rodrigo Torres Filho, Rodrigo Ribeiro, Rogério Shibata, Rosemara Amarilla, Ticiano Trento e Sérgio Batista Júnior, pelo esforço conjunto para concretizar esse projeto de pesquisa.

À minha esposa, Renata Diniz, pela ajuda no desenvolvimento do trabalho e, principalmente, pela paciência, incentivo e compreensão.

RESUMO

CELLIGOI, Gabriel. **Influência de janelas no conforto ambiental de uma câmara bioclimática de baixo custo**. 114f. Dissertação (Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

O extensivo uso de ambientes internos na atualidade e a relação entre conforto ambiental e eficiência energética é uma prerrogativa para o aperfeiçoamento dos sistemas de fechamento das edificações. Neste contexto, com o objetivo de possibilitar o estudo experimental relacionado ao conforto ambiental, foi construída em 2018 a Câmara Bioclimática de Baixo Custo (CBBC), na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, em Curitiba. Após sua conclusão, foram desenvolvidos diversos testes a fim de verificar a adequação da câmara às condições de conforto ambiental além de buscar identificar pontos frágeis nas instalações da envoltória. Em atividades exploratórias e comprobatórias, constatou-se que as janelas dos módulos são os pontos de maior fragilidade termoacústica de todo o sistema. O objetivo principal desta pesquisa é analisar como janelas influenciam o conforto ambiental no interior da CBBC, considerando as condições climáticas de Curitiba/PR. Para tal, foi identificado o impacto termoacústico de diferentes janelas, sua capacidade de vedação e analisou-se as condições de conforto ambiental proporcionadas pelas janelas no interior da CBBC. Com a melhoria da eficiência das janelas conclui-se que as condições de conforto ambiental nos módulos da CBBC serão aprimoradas, e imagina-se que a câmara proporcionará melhores resultados aos estudos que serão desenvolvidos em suas instalações.

Palavras-chave: Janela. Conforto Ambiental. Câmara climática. Qualidade do ambiente interno. Ambiente construído.

ABSTRACT

CELLIGOI, Gabriel. **Window's influence in the environmental comfort within a Cost-effective Bioclimatic Chamber.** 114p. Dissertation (Master Degree in Post-Graduate Programme in Civil Engineering) - Federal University of Technology - Parana. Curitiba, 2020.

The extensive use of indoor environments today and the relationship between environmental comfort and energy efficiency is a prerogative for the buildings' envelope improvement. Under these circumstances, in order to enable the experimental study related to environmental comfort, the Low-Cost Bioclimatic Chamber (CBBC) was built in 2018, at the Federal University of Technology from the State of Paraná (UTFPR). After its conclusion, several tests were developed in order to verify the suitability of the chamber to the conditions of environmental comfort, furthermore seeking to identify fragile points in its envelope. In exploratory activities, it was found that the windows are the points of greatest thermoacoustic fragility of the entire system. The main objective of this research is to analyze how windows influence environmental comfort inside CBBC, considering the climatic conditions of Curitiba/PR. To this end, the thermoacoustic impact of different windows was identified as well as their sealing capacity and the conditions of environmental comfort provided by the windows inside CBBC. With the improvement of the windows' efficiency it is concluded that the conditions of environmental comfort in the CBBC modules will be improved, and it is imagined that the chamber will provide better results to the studies that will be developed in its installations.

Keywords: Window. Indoor Environmental Comfort. Climate Chamber. Indoor Environmental Quality. Built Environment.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Curvas de avaliação de ruído NC.....	35
Figura 2 - Célula teste PASSYS Project.....	37
Figura 3 – <i>Testing and Demonstration Platform for Building Energy Research</i> . (a): Diagrama esquemático. (b): Módulo experimental. (c) Módulo controle.	38
Figura 4 - LOBSTER	39
Figura 5 - Câmara do <i>Building Energy and Environments Department</i>	40
Figura 6 - <i>Aachen Comfort Cube</i>	40
Figura 7 – Componentes dos sistemas de esquadrias.....	45
Figura 8 - Etapas da pesquisa.....	56
Figura 9 – Câmara Bioclimática de Baixo Custo (CBBC).....	57
Figura 10 - Implantação da CBBC.....	59
Figura 11 - Simulação da insolação em MC e ME nos solstícios de verão e inverno.....	60
Figura 12 - Envoltória da CBBC: (A) corte; (B) detalhe	61
Figura 13 - Termografia da janela da CBBC: (A, B, C) Interior; (D) exterior (05/04/2018).....	64
Figura 14 - Termografia interior: (A) Persiana fechada; (B) Persiana aberta (05/04/2018).....	65
Figura 15 - Janela duplicada em ME: (A) vista externa; (B) vista interna	68
Figura 16 - Estação meteorológica sobre MC	69
Figura 17 - Suporte de sensores	71
Figura 18 – Altura recomendada para obtenção de dados de temperatura em ambientes internos	72
Figura 19 - TagTemp Stick a 1,10m de altura e termômetro de globo presos ao suporte de sensores.....	72
Figura 20 – Sensor de temperatura instalado na aleta da evaporadora.....	76
Figura 21 – Mapa de ruído ambiental no entorno na CBBC.....	80
Figura 22 - Analisador de frequência	82
Figura 23 - Temperaturas no interior de MC entre 09 de março e 15 de março.....	84
Figura 24 - Temperaturas no interior de ME entre 09 de março e 15 de março.....	84
Figura 25 - Variação da temperatura radiante média em MC e ME entre 09 de março e 15 de março	85
Figura 26 – Temperaturas no interior de MC em 06 de maio de 2019	86
Figura 27 – Temperaturas no interior de ME em 06 de maio de 2019	87
Figura 28 - Variação da temperatura radiante média em MC e ME em 06 de maio de 2019	88
Figura 29 – Consumo acumulado dos aparelhos de ar condicionado em MC e ME ..	89
Figura 30 – Temperatura no interior de MC entre 05 e 12 de julho de 2019	90
Figura 31 – Temperatura no interior de ME entre 05 e 12 de julho de 2019	91
Figura 32 - Variação da temperatura radiante média em MC e ME entre 05 e 12 de julho.....	92

Figura 33 – Temperatura Radiante Média em MC e ME entre 2 e 5 de julho de 2019	94
Figura 34 - Variação da iluminância em MC e ME nos dias 29 de fevereiro e 1 de março de 2020	95
Figura 35 - Iluminância em MC	96
Figura 36 - Iluminância em ME.....	96
Figura 37 - Concentração de CO ₂ na primeira etapa de monitoramento	98
Figura 38 - Concentração de CO ₂ na segunda etapa de monitoramento.....	98
Figura 39 - Logaritmo de normalização da concentração de CO ₂ em MC e ME na primeira etapa	100
Figura 40 - Logaritmo de normalização da concentração de CO ₂ em MC e ME na segunda etapa.....	101
Figura 41 - Análise espectral da média das medições para MC (abril 2018)	104
Figura 42 - Análise espectral da média das medições para ME (abril 2018)	104
Figura 43 – Medições em ME com janela simples (abril 2018) e duplicada (abril 2019)	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diferença padronizada de nível ponderada da vedação externa para ensaios de campo	32
Tabela 2 - Valores de referência para ambientes internos de acordo com seu uso..	33
Tabela 3 - Classificação de esquadrias quanto ao seu funcionamento.....	44
Tabela 4 - Caracterização da janela da CBBC segundo a NBR 15220/2005.....	63
Tabela 5 - Valores de U e FS para vidro temperado 6mm e vidro laminado 8mm	67
Tabela 6 - Custos de fornecimento e instalação das janelas de MC e ME	67
Tabela 7 - Taxa de renovação do ar (h^{-1}) em MC e ME	99
Tabela 8 - Vazão do ar (m^3/h) em MC e ME.....	99
Tabela 9 - Nível de pressão sonora ponderado em A para MC	102
Tabela 10 - Nível de pressão sonora ponderado em A para ME.....	103
Tabela 11 - Síntese dos resultados obtidos	106

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS.....	15
1.1.1 Objetivo Geral.....	15
1.1.2 Objetivos Específicos.....	15
1.2 HIPÓTESE.....	16
1.3 JUSTIFICATIVAS	16
1.4 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	19
2 REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1 CONFORTO AMBIENTAL, EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E QUALIDADE DO AMBIENTE INTERNO	21
2.1.1 Eficiência Energética	21
2.1.2 Qualidade do Ambiente Interno	23
2.1.3 Conforto Térmico	25
2.1.4 Conforto Acústico.....	29
2.2 CÂMARAS CLIMÁTICAS.....	35
2.2.1 Câmaras Expostas às Condições Externas.....	36
2.2.2 Câmaras Instaladas no Interior de Edificações.....	39
2.3 JANELAS: CARACTERIZAÇÃO E ESTUDOS	41
2.3.1 Normatização.....	42
2.3.2 Sistemas de Esquadrias	43
2.3.2.1 Esquadrias de aço	46
2.3.2.2 Esquadrias de alumínio.....	46
2.3.2.3 Esquadrias de PVC.....	47
2.3.2.4 Esquadrias de madeira	47
2.3.3 Vidros.....	47
2.3.3.1 Vidro <i>float</i>	48
2.3.3.2 Vidro impresso	48
2.3.3.3 Vidro serigrafado.....	49
2.3.3.4 Vidro temperado.....	49
2.3.3.5 Vidro laminado	50
2.3.3.6 Vidro aramado.....	50
2.3.3.7 Vidro insulado	50
2.3.3.8 Vidro de controle solar	51
2.3.4 Estudos sobre eficiência de janelas.....	51
3 METODOLOGIA.....	55
3.1 OBJETO DE ESTUDO: CÂMARA BIOCLIMÁTICA DE BAIXO CUSTO (CBBC)	

3.2	INSTALAÇÃO DE JANELA DUPLICADA EM ME.....	65
3.3	OBTENÇÃO DE DADOS DE TEMPERATURA EM PERÍODO QUENTE.....	68
3.3.1	Monitoramento em Dias Quentes sem Ar Condicionado	69
3.3.2	Monitoramento em Dias Quentes com Ar Condicionado	74
3.4	OBTENÇÃO DE DADOS DE TEMPERATURA EM PERÍODO FRIO	74
3.4.1	Monitoramento em Dias Frios sem Ar Condicionado.....	75
3.4.2	Monitoramento em Dias Frios com Ar Condicionado.....	75
3.5	OBTENÇÃO DE DADOS DE ILUMINAÇÃO NATURAL	77
3.6	OBTENÇÃO DE DADOS DE CONCENTRAÇÃO DE CO ₂	77
3.7	OBTENÇÃO DE DADOS ACÚSTICOS	79
4	RESULTADOS	83
4.1	COMPARAÇÃO DE TEMPERATURAS EM PERÍODO QUENTE	83
4.1.1	Monitoramento em Dias Quentes sem Ar Condicionado	83
4.1.2	Monitoramento em Dias Quentes com Ar Condicionado	85
4.2	COMPARAÇÃO DE TEMPERATURAS EM PERÍODO FRIO	90
4.2.1	Monitoramento em Dias Frios sem Ar Condicionado.....	90
4.2.2	Monitoramento de Dias Frios com Ar Condicionado.....	92
4.3	COMPARAÇÃO DE DADOS DE ILUMINAÇÃO NATURAL.....	94
4.4	COMPARAÇÃO DE DADOS DE CONCENTRAÇÃO DE CO ₂	97
4.5	COMPARAÇÃO DOS DADOS DE ACÚSTICA.....	102
4.6	SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	105
5	CONCLUSÕES	107
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	109
	REFERÊNCIAS.....	110

1 INTRODUÇÃO

Um dos papéis fundamentais da arquitetura é proporcionar abrigo ao ser humano (DE BOTTON, 2007). Protegido das variáveis climáticas, o homem busca conforto físico e psicológico para melhorar seu bem-estar e saúde, assim como aumentar o desempenho em atividades cognitivas (LAMBERTS *et al.*, 2014). Diversos estudos relacionam a qualidade do ambiente interno com índices de produtividade e qualidade de vida (FISK, 2002; WYON, 2004; SEPPÄNEN, 2005; SINGH *et al.*, 2010; MACNAUGHTON *et al.*, 2017).

O conjunto de condições ambientais que proporcionam bem-estar térmico, visual, acústico e antropométrico é chamado de conforto ambiental (LAMBERTS *et al.*, 2014). Schmid (2005) defende que o conforto ambiental deve ser estudado de uma forma holística, adicionando às características físicas do ambiente uma visão que englobe aspectos fisiológicos, socioculturais e psicológicos.

Estudos de conforto ambiental podem ser feitos em ambientes reais, porém Langkilde (2010) lembra a importância de estudos desenvolvidos em laboratórios. Segundo o autor, P. Ole Fanger foi um dos precursores desse tipo de abordagem, trabalhando com câmaras climáticas nos Estados Unidos e, posteriormente, implantando na Dinamarca a primeira câmara climática voltada ao estudo de conforto térmico.

Câmaras climáticas são, desta forma, ambientes laboratoriais que podem ter diversas funções, entre as quais o estudo de conforto ambiental. Quando voltadas a este propósito, as câmaras permitem ao pesquisador ter o controle de variáveis ambientais e pessoais, assim como simular diversas situações de conforto ou estresse térmico ao usuário (CARVALHAIS, 2011).

Para estudos de conforto ambiental em Curitiba, foi construída em 2018 na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) a Câmara Bioclimática de Baixo Custo (CBBC), assim denominada por ter utilizado poucos recursos financeiros em sua construção e por acolher em sua concepção parâmetros da NBR 15.220/2003: Desempenho térmico das edificações, que define o Zoneamento Bioclimático Brasileiro e estratégias construtivas para otimizar o desempenho de edificações (TREVISAN, 2019).

A CBBC é composta por dois módulos independentes denominados Módulo Controle (MC) e Módulo Experimental (ME), viabilizando assim pesquisas

comparativas e ensaios simultâneos sob uma mesma condição climática. Os módulos ficam expostos às variações climáticas e são rotacionáveis, possibilitando estudos envolvendo orientação solar, como descreve Trevisan (2019), em sua pesquisa que teve como foco principal a concepção, construção e verificação da aplicabilidade da CBBC em estudos de conforto ambiental.

Ao longo de 2018 foram desenvolvidos diversos testes pelo Grupo de Trabalho CBBC (GT CBBC) da UTFPR a fim de verificar a adequação termoacústica da câmara. O trabalho de Trevisan (2019) buscou analisar se o comportamento de MC e ME é comparável, além de buscar identificar pontos frágeis nas instalações da envoltória. Em atividades exploratórias e comprobatórias, constatou-se que as janelas dos módulos são os pontos de maior fragilidade termoacústica de todo o sistema. A vedação insuficiente das janelas cria pontes térmicas e permite transmissão sonora indesejável para o interior dos ambientes (TREVISAN, 2019).

1.1 OBJETIVOS

Com a melhoria das condições de conforto ambiental nos módulos da CBBC, imagina-se que a câmara proporcionará resultados mais precisos aos estudos que serão desenvolvidos em suas instalações. A fim de buscar tais progressos, são listados os objetivos a seguir.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal desta pesquisa é analisar como as esquadrias e os vidros de janelas influenciam as condições de conforto ambiental de uma Câmara Bioclimática de Baixo Custo, considerando as condições climáticas de Curitiba/PR.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar o impacto de diferentes tipos de janelas no desempenho termoacústico da CBBC;
- Avaliar a estanqueidade de diferentes janelas;
- Avaliar as condições de conforto ambiental proporcionadas pelas janelas no interior da CBBC;
- Tornar a CBBC mais eficiente do ponto de vista do conforto ambiental.

1.2 HIPÓTESE

Tem-se como hipótese que a instalação de uma nova janela, sobreposta à existente, formando um sistema duplo, pode melhorar as condições de conforto termoacústico no interior da CBBC, fazendo com que este ambiente se torne mais eficiente além de diminuir a influência de variações climáticas no interior da Câmara, contribuindo para resultados mais confiáveis em experimentos futuros.

Supõe-se que o ganho termoacústico seja consequência da melhor vedação do sistema duplo, o que pode influenciar na qualidade do ambiente interno caso não haja trocas de ar suficientes com o meio externo.

1.3 JUSTIFICATIVAS

Os recursos para a viabilização financeira da CBBC foram provenientes de programas de apoio à pesquisa (KRÜGER, 2016) e doações de insumos e serviços advindos de parcerias com a iniciativa privada (TREVISAN, 2019).

Porém, devido ao cenário político-econômico do país na época, os repasses não seguiram o cronograma da obra de implantação da CBBC e a solução adotada para as janelas, com a utilização de vidro temperado sem esquadrias, mostrou-se frágil no isolamento térmico e ineficiente do ponto de vista acústico (TREVISAN, 2019).

Tendo em vista os investimentos já aplicados na câmara e os recursos remanescentes do Edital Universal MCTI/CNPq nº 01/2016, existe agora a oportunidade de se estudar qual seria a melhor solução para o fechamento das

aberturas dos dois módulos e implantar esta benfeitoria, aprimorando as instalações da CBBC.

A tecnologia de vidros e sistemas de esquadrias tem evoluído constantemente. Está disponível no mercado uma grande variedade de produtos, cada um com diferentes características. Além dos vidros, as esquadrias também têm um papel importante na eficiência da janela e podem ser manufaturadas com diferentes materiais, dentre os quais os mais comuns são a madeira, o alumínio e o Policloreto de vinila - PVC (JELLE *et al.*, 2012).

Segundo Gustavsen *et al.* (2007), as janelas têm um importante papel no isolamento térmico de um edifício. Isso ocorre devido à diferença entre a transmitância térmica de janelas e dos outros componentes da envoltória das construções.

Transmitância térmica representa a quantidade de calor que atravessa um metro quadrado de um elemento construtivo qualquer quando submetido a uma diferença de temperatura (WESTPHAL, 2016).

Geralmente, a transmitância térmica de janelas é maior do que a de outros fechamentos. Assim, essas aberturas permitem maior troca de calor entre o ambiente interno e o externo. Os autores apontam que, em edificação com janelas cobrindo 30% das fachadas, a troca térmica que acontece através das aberturas é cerca de 60% do total da troca térmica do edifício (GUSTAVSEN *et al.*, 2007).

Outro índice que avalia o desempenho de vidros é o fator solar, que representa a parcela da radiação solar que atravessa o vidro como calor. Compreende tanto a parcela da radiação solar transmitida diretamente para o interior, como a quantia que é absorvida no painel de vidro e irradiada para dentro do ambiente (WESTPHAL, 2016).

Dada a importância das janelas no isolamento térmico de uma edificação, Ahn *et al.* (2015) destacam que em edificações antigas, cujas esquadrias foram feitas com tecnologias ultrapassadas ou encontram-se deterioradas, técnicas de *retrofit*¹ ou substituição de janelas podem melhorar sua eficiência energética e o conforto térmico dos usuários.

¹ *Retrofit* é um termo utilizado na construção civil para o processo de modernização e atualização de edificações. A incorporação de novas tecnologias a edifícios antigos busca valorizá-los ao mesmo tempo em que prolonga sua vida útil, seu conforto e sua funcionalidade. Etimologicamente, a palavra deriva de “*retro*”, do latim, movimentar-se para trás, e “*fit*”, do inglês, adaptação ou ajuste. (ROCHA; QUALHARINI, 2001)

Do ponto de vista da poluição sonora, Carvalho (2010) comenta que o crescimento das cidades aumenta a geração de ruídos, o que dificulta o conforto acústico no interior de edifícios. Parati *et al.* (2015) validaram a ideia de que no contexto urbano o uso de janelas de alta performance e o uso de técnicas de *retrofit* aumentam significativamente o conforto acústico em edifícios antigos.

Mankibi *et al.* (2015) buscaram alternativas que incluam o uso de janelas duplicadas para melhorar as condições termoacústicas de edificações preservadas. Segundo os autores, a instalação de janelas sobressalentes do lado de dentro das janelas existentes pode ser uma solução eficiente e de baixo custo para imóveis com interesse de preservação, visto que em edificações consideradas patrimônio históricos devem ser preservadas a aparência e as características externas da fachada.

Assim, resta uma lacuna para testar e certificar técnicas de baixo custo que visem melhorar a capacidade térmica e acústica de edifícios existentes no Brasil, visto que grande parte dos edifícios brasileiros não acompanhou os avanços da tecnologia de vidros e esquadrias. O estudo de soluções de janelas de baixo custo para melhorar a eficiência termoacústica na CBBC busca contribuir com o preenchimento deste espaço, mostrando opções viáveis de serem aplicadas em edificações urbanas.

No caso de edificações novas, cabe citar que em 19 de junho de 2013 entrou em vigor uma nova norma de desempenho para edificações habitacionais brasileiras. Trata-se da NBR 15.575: Edificações Habitacionais – Desempenho, da qual destaca-se aqui a parte 4, na qual são estabelecidos requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas. A NBR 15.575/2013 não se aplica a obras já concluídas ou em andamento na data de entrada em vigor, tampouco a reformas ou *retrofit* de edificações existentes (CBIC, 2013).

A implantação da norma buscou estabelecer um novo padrão de eficiência às edificações habitacionais e não se pode descartar a importância do desempenho das janelas na qualidade termoacústica das novas edificações.

À luz da referida norma, Coelho *et al.* (2018) concluem que em sistemas de vedações verticais, a redução sonora proporcionada pelas esquadrias possui maior importância do que aquela assegurada pela alvenaria de vedação.

Do ponto de vista do desempenho térmico, cabe citar os resultados obtidos por Silveira (2014), nos quais é possível verificar elevados ganhos de calor em

fachadas envidraçadas. Segundo o autor, a orientação solar de elementos transparentes tem maior impacto no desempenho térmico da edificação se comparada com a orientação de sistemas opacos.

Financeiramente, o custo de esquadrias e vidros representa mais de 8% do custo total de uma obra habitacional de padrão médio ou alto (SOUSA *et al.*, 2017). Assim, dado o impacto da qualidade das janelas no desempenho termoacústico de edificações e a representatividade do custo de janelas na construção civil, mostram-se válidos estudos que visem aumentar a relação custo-benefício destes elementos de vedação.

Devido ao exposto, a pesquisa se justifica, primeiramente, por contribuir para o aperfeiçoamento da CBBC, um ambiente laboratorial destinado a estudos de conforto ambiental que, para melhores resultados em trabalhos futuros, precisa aprimorar suas condições termoacústicas. O presente estudo coopera também explorando alternativas de baixo custo para janelas, a fim de colaborar com o desempenho energético de edificações existentes que não se enquadram nas atuais normas de desempenho vigentes no país.

Nesse sentido, soluções de baixo custo, como as janelas duplicadas instaladas na CBBC, podem servir para suprir a demanda por conforto ambiental tanto em construções existentes de baixa renda quanto em edificações históricas com interesse de preservação.

1.4 CONTEXTUALIZAÇÃO

Segundo Trevisan (2019), a CBBC foi concebida para ser utilizada como um laboratório para desenvolvimento de estudos em conforto ambiental na cidade de Curitiba, Paraná, pertencente à Zona Bioclimática 1 (ZB1) na classificação dada pela NBR 15220 (ABNT, 2005).

Curitiba (25°25'40" S, 49°16'23" W, 934 m – IBGE, 2019) está situada na região Sul do Brasil, sendo a capital mais fria do país, e possui clima temperado marítimo úmido (Cfb), segundo a classificação de Köppen-Geiger. Com verões frescos, sem estação seca e com ocorrência frequente de geadas severas no inverno, o clima da cidade caracteriza-se como sendo mesotérmico e subtropical (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Após a construção da CBBC foram feitos diversos ensaios para provar a similaridade entre MC e ME além de testar a funcionalidade de cada módulo, a percepção do usuário e o isolamento termoacústico da sua envoltória. Tais testes mostraram que a janela é o ponto termicamente mais frágil da câmara, permitindo grande troca de calor com o meio externo devido à falta de vedação (TREVISAN, 2019).

Em agosto de 2018 foi realizada uma Avaliação Pós-Ocupação (APO) a partir de um questionário elaborado pelos autores, cobrindo temáticas ligadas ao conforto ambiental. Ornstein (2005) define APO como uma série de técnicas aplicadas ao longo do uso de um determinado ambiente para avaliar seu desempenho sob a ótica de usuários, levando em consideração o nível de satisfação e o atendimento às necessidades dos ocupantes.

Durante a APO, a janela de MC permaneceu voltada para o Norte – exposta a ruído intenso proveniente de uma via rápida – enquanto a de ME foi orientada para sul. No início do experimento as janelas de ambos os módulos se encontravam fechadas, porém, o ajuste era permitido aos ocupantes. O estudo contou com 136 voluntários e constatou que quando a janela é voltada para a via rápida ou quando ela é aberta, a insatisfação do usuário com o conforto acústico aumenta consideravelmente e a percepção do ruído de veículos é mais intensa. Tal resultado demonstra que a substituição das janelas existentes é essencial para aumentar o isolamento acústico, uma vez que a orientação Norte pode ser usada em pesquisas futuras visto que traz maior insolação para dentro da Câmara (TREVISAN *et al.*, 2019).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONFORTO AMBIENTAL, EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E QUALIDADE DO AMBIENTE INTERNO

2.1.1 Eficiência Energética

Alain de Botton, em seu livro *A Arquitetura da Felicidade* (2007), reflete que a construção do belo, antes vista como a principal função do arquiteto, há tempos perdeu espaço nos debates profissionais frente à racionalidade imposta pelo movimento moderno.

Até o século XIX, a arquitetura de importantes edifícios era permeada por uma série de adornos funcionalmente desnecessários. Porém, a influência da engenharia e da tecnologia trouxe à arquitetura um caráter científico capaz de justificar as decisões projetuais. Embora muitos conceitos tenham mudado desde a ascensão do movimento moderno, a presença da ciência como justificativa para as decisões arquitetônicas perdura até hoje (DE BOTTON, 2007).

Neste contexto, a preocupação com as mudanças climáticas tem ditado muitas justificativas projetuais, uma vez que imprime à arquitetura um papel fundamental no combate ao aquecimento global. Os parâmetros para a boa arquitetura, agora, devem incluir o contexto climático e o desempenho energético da edificação. Lamberts *et al.* (2014) corroboram com tais diretrizes para a arquitetura quando sacramentam que um bom projeto deve, ao mesmo tempo, ser energeticamente eficiente e atender às necessidades de conforto do usuário a partir da análise climática e do programa de necessidades.

O peso das decisões arquitetônicas reflete diretamente no desempenho das edificações. Segundo a análise anual elaborada pela *International Energy Agency* (IEA, 2018), em 2017 a energia consumida em edifícios foi responsável por cerca de 30% do consumo global. O relatório ainda pontua que a maior parte deste gasto é proveniente de sistemas de aquecimento e resfriamento dos ambientes e de iluminação artificial.

Ou seja, grande parte do consumo energético mundial está relacionada à busca por conforto no ambiente construído. Eficiência energética, na concepção de

Lamberts *et al.* (2014), refere-se justamente ao potencial de uma edificação em proporcionar conforto térmico, visual e acústico consumindo pouca energia.

A procura por edifícios mais eficientes muitas vezes leva o arquiteto a buscar soluções oriundas da arquitetura vernacular, que é aquela originária de sucessivas adaptações e influenciada pelas tradições e cultura de um povo. A arquitetura vernacular se modifica de acordo com o clima, terreno e cultura da região e contém soluções empíricas de otimização de energia (ZHAI; PREVITALI, 2010).

Van Lengen (2004) reforça a importância de trazer referências vernaculares para o convívio dos arquitetos, dando sumária importância à observância do clima local no processo projetual da arquitetura. Uma corrente que considera fatores naturais como clima, luz solar, vento, vegetação e topografia na concepção arquitetônica é a Arquitetura Bioclimática.

Victor Olgay (2008) utilizou o termo arquitetura bioclimática para definir as edificações que se relacionam com o clima. Segundo o autor, os arquitetos devem utilizar as características naturais no desenvolvimento de seus projetos. Então, em regiões com climas semelhantes, as soluções arquitetônicas também serão semelhantes. Para Olgay, a forma mais racional de projetar seria trabalhar com as forças da natureza, e não contra elas, aproveitando suas potencialidades para proporcionar conforto aos usuários.

Lamberts *et al.* (2014) lembram que o arquiteto deve considerar tanto o uso de sistemas naturais quanto artificiais para buscar obter condições de conforto adequadas. O responsável pelo projeto deve avaliar o impacto das diferentes soluções no partido arquitetônico e na eficiência energética da edificação.

Quando estratégias naturais se mostram mais adequadas, deve-se compreender as condições locais e analisar as variáveis climáticas utilizando ferramentas como os diagramas bioclimáticos. Esses diagramas foram propostos inicialmente por Olgay (2008) com o objetivo de auxiliar nas estratégias de adaptação da arquitetura ao clima.

A bioclimatologia aplicada à arquitetura expõe diferentes soluções que auxiliam na eficiência energética da edificação. Desta forma, as estratégias originadas nos conceitos bioclimáticos ajudam o arquiteto a produzir arquitetura de qualidade e em consonância com os problemas do século XXI.

2.1.2 Qualidade do Ambiente Interno

De acordo com levantamento feito pela *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers - ASHRAE* (2010), o ser humano passa entre 80% e 90% do seu tempo dentro de ambientes fechados, sendo que a qualidade do ambiente interno tem implicações sobre o conforto, saúde e bem-estar do indivíduo.

Em seu estudo sobre a epidemiologia das doenças ocasionadas por edifícios fechados, Sterling *et al.* (1991) explicam que no início do século XX os edifícios administrativos começaram a crescer em tamanho na América do Norte e Europa. Para que essas grandes construções funcionassem, foi necessário a evolução de sistemas de aquecimento, resfriamento e sucção de ar externo. No início, a preocupação de engenheiros e projetistas era prevenir a infiltração da poluição externa. Porém, devido à grande escala das novas construções, os edifícios se tornaram dependentes dos sistemas artificiais e os subprodutos dos equipamentos e dos processos de limpeza utilizados criaram cenários de poluição interna.

Desde então, os usuários destes modernos edifícios têm relatado problemas de saúde como dor de cabeça, irritação nos olhos, problemas nasais, incômodos na garganta e fadiga. Os sintomas relacionados à falta de qualidade no ambiente interno foram definidos pela Organização Mundial da Saúde (WHO, 1988) como Síndrome do Edifício Doente.

Suas causas, segundo a Organização (WHO, 1988), estão relacionadas a edifícios selados, janelas não operáveis, moradias com ambientes apertados, aumento de temperatura, poeira e utilização de produtos químicos no interior dos edifícios.

Estudo desenvolvido por Seppänen e Fisk (2005) mostra as relações entre a qualidade do ambiente interno e a saúde e performance do usuário no trabalho, sugerindo que a Síndrome do Edifício Doente impacta na produtividade dos ocupantes. O estudo mostrou que aumentando a ventilação do ambiente, diminuem as ausências no trabalho e aumenta a produtividade dos trabalhadores.

Estudo de campo desenvolvido por Wyon (2004) corrobora com essa ideia a medida em que comprova que a baixa qualidade do ar em ambientes internos reduz a performance de trabalhadores entre 6% e 9% em edifícios de escritórios.

Al Horr *et al.* (2016) apontam que para melhorar a qualidade do ar interno é imprescindível que haja trocas de ar nos ambientes. Segundo os autores, a literatura aponta que a ventilação natural é uma solução energeticamente eficiente, uma vez que independe do uso de energia elétrica para propiciar trocas de ar entre o ambiente interno e o externo. Porém, essa alternativa pode ser perigosa em cidades com altos índices de poluição. Nestes casos, a ventilação mecânica pode ser recomendada pois possui uma série de filtros que podem melhorar a qualidade do ar que entra na edificação.

O conforto térmico também é importante para garantir a qualidade interna do ambiente e, assim, a saúde e a produtividade dos ocupantes. Um exemplo disso é o estudo de Seppänen e Fisk (2005), no qual se conclui que a performance dos usuários tem seu auge entre 20 e 23°C, sendo que ocorre uma piora significativa com o aumento da temperatura a patamares superiores a 25°C em condições de clima frio ou moderado e umidade inferior a 30%.

Estudo desenvolvido em 2004 (WYON, 2004), que buscou mensurar os efeitos da qualidade do ar de ambientes internos na produtividade humana, confirma que aumentos na temperatura do ar têm efeito negativo no desempenho dos trabalhadores em escritórios. O experimento expôs usuários a temperaturas de 22, 26 ou 30°C por 3 horas em ambiente de escritórios e concluiu que quanto mais alta é a temperatura, maiores são os desconfortos em olhos, nariz e garganta e menores são a concentração e a performance dos indivíduos.

É relevante mencionar que o conforto térmico é um conceito subjetivo e depende não apenas de variáveis mensuráveis – a temperatura do ar, a temperatura radiante, a umidade relativa e a velocidade do ar – como também de fatores psicológicos e fisiológicos, como sexo e idade, por exemplo (ASHRAE, 2010).

No que diz respeito ao conforto acústico, pode-se afirmar que existe uma relação entre os níveis de ruído dos ambientes e a produtividade e concentração dos usuários (AL HARR *et al.*, 2016).

Com o crescimento dos escritórios de planta livre cresceram os problemas relacionados ao conforto acústico e à privacidade dos trabalhadores, como apontado no estudo de Wyon (2004). Nesta investigação, o autor conclui que a distração causada por ruídos constantes acima de 55dBA tem um efeito negativo na produtividade de atividades complexas de escritórios de planta livre.

A literatura disponível relativa à Qualidade do Ambiente Interno identifica tanto as bases para um edifício saudável quanto os problemas causados por edifícios “doentes”. Para manter a saúde e os atributos cognitivos dos usuários, os ambientes internos precisam satisfazer condições mínimas de conforto ambiental e de qualidade do ar por meio de boa ventilação, temperatura dentro da faixa de aceitabilidade, baixos níveis de ruídos e iluminação adequada.

2.1.3 Conforto Térmico

Segundo a ASHRAE (2005), conforto térmico reflete a satisfação da pessoa com o ambiente térmico que a envolve. Atinge-se o conforto térmico quando o balanço de todas as trocas de calor entre o ser humano e o meio que o envolve for nulo e a temperatura da pele e suor estiverem dentro de certos limites (LAMBERTS *et al.*, 2014).

O ser humano é homeotérmico e, portanto, sua temperatura interna tende a ser constante independente das situações externas. Porém, as trocas térmicas entre o corpo e o meio podem ocasionar desconforto. O primeiro grau de proteção do ser humano é a pele e os mecanismos termorreguladores do corpo. Em situações de frio o corpo inicia procedimentos para evitar as perdas térmicas e, em dias quentes, os mecanismos corporais buscam perder calor (LAMBERTS *et al.*, 2014).

A vestimenta tem um papel importante no auxílio ao homem na busca por conforto térmico por servir como barreira às trocas de calor, uma vez que a camada de ar estagnada junto ao corpo inibe ações de convecção e radiação. Em dias frios, a indumentária funciona como isolante térmico, ao passo que em períodos quentes, ela reduz o ganho de calor por radiação solar direta (FROTA; SCHIFFER, 2001).

Além da vestimenta, que funciona como uma segunda pele para o ser humano, o abrigo figura como o terceiro nível de proteção. Para que a edificação seja efetiva em sua função de proteger o homem das intempéries, Frota e Schiffer (2001) recomendam que sejam observadas as características térmicas dos materiais empregados e as premissas do partido arquitetônico, que devem ser adequadas ao clima em que a edificação está implantada.

Para compreender o comportamento térmico das edificações, faz-se necessário conhecer os fenômenos de trocas térmicas entre corpos com

temperaturas diferentes. As trocas térmicas podem ser secas ou úmidas, classificadas assim pela presença ou não de água no processo.

Os mecanismos de troca seca são (FROTA; SCHIFFER, 2001):

- Convecção: Troca de calor entre um corpo sólido e um corpo fluido (líquido ou gasoso);
- Radiação: Troca de calor entre dois corpos distantes entre si por meio da capacidade dos corpos em emitir ou absorver energia;
- Condução: Troca de calor entre dois corpos que se tocam ou entre partes de um mesmo corpo.

Os mecanismos de troca úmida são (FROTA; SCHIFFER, 2001):

- Evaporação: Troca de calor por meio da mudança de estado líquido para gasoso;
- Condensação: Troca de calor por meio da mudança de estado gasoso para líquido.

Ainda segundo Frota e Schiffer (2001), a adequação da arquitetura ao clima está relacionada à racionalização do uso de energia, diminuindo o uso de condicionamento térmico artificial, seja para aquecimento ou para resfriamento de ambientes. Assim, busca-se, a medida do possível, o controle natural das variáveis que influenciam o conforto térmico.

As variáveis de conforto térmico que podem ser medidas são a temperatura do ar, a temperatura radiante, a umidade relativa e a velocidade do ar. Além destas, a atividade física e a vestimenta também interferem na sensação de conforto, assim como fatores fisiológicos e psicológicos (ASHRAE, 2010).

Desta forma, o conforto térmico, entendido como uma sensação humana, é subjetivo e depende de experiências passadas, expectativas, da percepção e da resposta a estímulos sensoriais de cada indivíduo (LAMBERTS *et al.*, 2014).

A subjetividade dificulta a previsão de situações nas quais o conforto térmico pode ou não acontecer. Por isso, foram criados índices que tentam enquadrar essa sensação em determinados parâmetros.

Um dos principais índices é o Voto Médio Predito (PMV, do inglês *Predicted Mean Vote*), que considera a temperatura radiante média, a velocidade do ar, a umidade relativa, a temperatura do ar, a atividade física do indivíduo e a vestimenta. O PMV teve origem em experimentos realizados por Fanger (1984) em câmaras climáticas e visa traduzir a sensibilidade humana ao frio e ao calor por meio de uma escala de 7 números na qual zero é a situação de conforto, os números negativos representam o frio e os positivos, o calor (LAMBERTS *et al.*, 2014).

Com base no PMV, foi criado o conceito de Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas (PPD, do inglês *Predicted Percentage of Dissatisfaction*), que pretende estimar o percentual de pessoas termicamente desconfortáveis em determinado ambiente, considerando que, devido à variação biológica entre as pessoas, é impossível que todos os ocupantes de um ambiente se sintam termicamente confortáveis ao mesmo tempo.

O PMV compreende um modelo estático para predição do conforto térmico, ou seja, assume que a temperatura de conforto é uma constante. Dúvidas quanto à aplicação do modelo estático em diferentes regiões climáticas originaram o modelo adaptativo, que adota como premissa que a temperatura de conforto varia de acordo com a adaptação de cada pessoa ao clima (DE DEAR *et al.*, 1997).

De Dear *et al.* (1997) conduziram experimento no interior de 160 edifícios de escritórios em quatro continentes a fim de desenvolver um modelo adaptativo de conforto térmico. A análise de dados comparou resultados obtidos em edifícios dotados de sistema de climatização artificial com aqueles adquiridos em edifícios ventilados naturalmente e concluiu que os usuários de edifícios ventilados naturalmente são mais tolerantes às variações de temperatura e considera que, quando submetidas a condições de desconforto térmico, os ocupantes podem tomar medidas para melhor se adaptarem às condições do ambiente interno.

Segundo de Dear *et al.* (1997), os mecanismos de adaptação são divididos em três categorias: ajustes comportamentais, fisiológicos e psicológicos.

Os ajustes comportamentais refletem a modificação do ambiente pelo usuário. Estes ajustes, conscientes ou inconscientes, podem ser pessoais – quando acontece a troca de peças de roupas, ajuste da postura ou início de uma atividade - ou tecnológicos – quando o ocupante abre ou fecha uma janela ou ajusta aparelhos de ar condicionado, por exemplo (DE DEAR *et al.*, 1997).

Ajustes fisiológicos são referentes às respostas fisiológicas das pessoas às variações de temperatura. Esses fatores estão atrelados à herança genética do indivíduo e à aclimação (DE DEAR *et al.*, 1997).

Por fim, os ajustes psicológicos acontecem devido às percepções e reações das informações sensoriais. Ou seja, o estresse térmico é atenuado pela expectativa ao clima interno de tal forma que, quando o indivíduo se habitua à determinada condição, acontece uma diminuição da intensidade de desconforto (DE DEAR *et al.*, 1997).

Até o desenvolvimento do modelo adaptativo de conforto térmico, o PMV foi utilizado como premissa na elaboração de importantes normas internacionais, limitando arquitetos e engenheiros quanto à utilização de ventilação natural em ambientes internos. Porém, com a revisão de normas como a ASHRAE 55 (2010) difundiu-se o conceito de que os usuários toleram maiores flutuações das condições ambientais se eles tiverem maior controle sobre o meio construído.

Hoje, as normas vigentes nacional e internacionalmente englobam uma grande gama de variáveis que influenciam o conforto térmico, seja em ambientes climatizados artificialmente ou não. As principais normas de referência aos estudos de conforto térmico estão descritas a seguir.

A ISO 7730/2005, denominada “*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*”, propõe um método para determinação da sensação térmica e o grau de desconforto de pessoas expostas a ambientes térmicos moderados, especificando condições térmicas de conforto.

A ASHRAE *Standard 55* (2010) estabelece condições ambientais para que o conforto térmico seja atingido em ambientes internos. A norma se propõe a especificar combinações de fatores ambientais e pessoais capazes de produzir condições de conforto ambiental para a maioria dos ocupantes de um espaço.

Na norma brasileira NBR 16401/2008 – Parte 2, são apontados parâmetros de conforto térmico para ambientes climatizados, visando proporcionar uma sensação térmica satisfatória em, pelo menos, 80% dos usuários. Essa norma está passando por uma revisão e, assim como aconteceu com a ASHRAE 55, seu novo escopo deverá incorporar os conceitos mais recentes ligados ao conforto adaptativo.

A NBR 15220/2005 – Parte 2 apresenta metodologias para cálculo de transmitância térmica, capacidade térmica, atraso térmico e fator solar de diversos

elementos construtivos a fim de auxiliar na composição da envoltória. A Parte 3 da referida norma, atualmente em processo de revisão, estabelece o Zoneamento Bioclimático Brasileiro e recomenda adequações construtivas para cada Zona, visando otimizar o desempenho térmico das edificações.

A Norma de desempenho de edificações NBR 15575/2013 apresenta os requisitos e critérios para verificação dos níveis mínimos de desempenho térmico de vedações verticais externas considerando o Zoneamento Bioclimático Brasileiro estabelecido na NBR 15220/2005. Os parâmetros da NBR 15575/2013, porém, limitam-se à adequação de paredes externas e internas, não sendo aplicáveis a janelas e outras aberturas (ABNT, 2013).

A normatização existente no Brasil, embasada principalmente nos estudos desenvolvidos por Givoni (1976), auxilia arquitetos e engenheiros a minimizar os problemas relacionados a subjetividade e individualidade da sensação térmica no interior de edifícios.

2.1.4 Conforto Acústico

Qualquer som é caracterizado por deslocamentos de partículas de um meio elástico em relação a sua posição de equilíbrio. As compressões e expansões do meio que ocorrem pela transmissão do som causam uma alteração de pressão chamada pressão sonora. A unidade para pressão sonora é o newton por metro quadrado (N/m^2) ou o Pascal (Pa) (GERGES, 1992).

A faixa de audição humana compreende o intervalo entre o limiar da audição ($0,00002 N/m^2$) e o limiar da dor ($200 N/m^2$). Para expressar números de ordens de grandeza tão diferentes em uma mesma escala linear, utiliza-se uma escala logarítmica, a escala Bel (B). Pelo fato de Bel ser um valor de divisão grande para os padrões auditivos humanos, é comum o uso do decibel (dB), que é um décimo do Bel (GERGES, 1992).

Gerges (1992) classifica ruído como sendo todo e qualquer som desagradável ou indesejável e atesta que o efeito do ruído não depende apenas de suas características (amplitude, frequência e duração), mas também da atitude do indivíduo com relação a ele. Portanto, a fronteira entre o som e o ruído não pode ser

definida com precisão, uma vez que a reação do indivíduo frente ao som depende de fatores subjetivos como seu estado emocional e sua personalidade.

O ouvido humano não é igualmente sensível ao som em todo o espectro de frequências. Um indivíduo exposto a dois ruídos iguais em intensidade, porém distintos em frequência, terá uma sensação auditiva diferente para cada uma das situações. Por isso, para que sons captados por equipamentos fossem relacionados à percepção humana, foram criadas curvas de compensação, que são designadas por letras (A, B, C, etc.) dependendo do tipo de ruído dominante captado nas medições. Cabe destacar que a curva de compensação A é a mais indicada para estudos de ruídos de tráfego. O nível sonoro ponderado pela curva A é dado por dB(A), pela curva B é dado em dB(B) e assim por diante (GERGES, 1992).

A permanente exposição a ruídos pode causar danos à saúde humana. A Organização Mundial de Saúde reconhece que a exposição contínua a ruídos pode levar não só à deficiência auditiva, como também a distúrbios do sono e psicológicos, como o estresse (WHO, 2018).

O crescimento desordenado das cidades proporcionou, entre outros efeitos, o aumento dos sons artificiais. Este fenômeno faz com que a preocupação com o conforto acústico tenha ganhado relevância nas últimas décadas. Isso acontece pela grande demanda em continuar construindo nos grandes centros urbanos (CARVALHO, 2010).

Pesquisa feita por WANG *et al.* (2015) mostra que, mesmo protegidos em ambientes internos, grande parte dos ocupantes de edifícios urbanos relatam desconforto causado por ruídos externos, principalmente provenientes do tráfego de automóveis. O trânsito é responsável por um desconforto contínuo que se faz presente mesmo de noite, diferente, por exemplo, dos sons oriundos de canteiros de obras, que, normalmente, cessam com o fim do horário usual de expediente.

A fragilidade acústica das construções tem sido negligenciada por muitos arquitetos e construtores no mundo todo. Isso tem impacto direto no mercado imobiliário visto que grande parte dos compradores de apartamentos residenciais mostram interesse em pagar um valor adicional por um imóvel que proporcione melhor qualidade acústica (WANG *et al.*, 2015).

Klæboe *et al.* (2004) citam que usuários de edifícios com esquadrias simples percebem com mais clareza os ruídos vindos de fora, porém, ressaltam que tais imóveis podem ser inferiores àqueles com janelas de melhor qualidade em diversos

outros aspectos que podem interferir no desempenho acústico. Portanto, mostra-se importante comparar sistemas de janelas diferentes instalados em ambientes semelhantes e inseridos em um mesmo contexto.

A fim de minimizar os danos causados por ruídos nos grandes centros urbanos, a Organização Mundial de Saúde recomenda que os níveis sonoros produzidos por tráfego de veículos sejam reduzidos para 53dB durante o dia e 45dB durante a noite. A recomendação é que a diminuição dos ruídos seja feita tanto na fonte, ou seja, na evolução tecnológica dos veículos, quanto na rota entre as avenidas e a população, por meio de melhorias na infraestrutura das cidades (WHO, 2018).

Diversas normas auxiliam arquitetos e engenheiros na avaliação da poluição sonora e na busca pelo conforto acústico em ambientes externos. Dentre elas se destacam as normas brasileiras NBR 10151/2019 Versão Corrigida:2020, que estipula procedimentos para avaliação do ruído em áreas habitadas visando o conforto da comunidade, a NBR 15575/2013, que aborda parâmetros acústicos para vedações e sistemas de piso, e a NBR 10152/2017 Versão Corrigida:2020, que estabelece os procedimentos para medições dos níveis de pressão sonora, determinação do nível sonoro representativo e avaliação sonora dos ambientes internos a partir da comparação dos resultados obtidos com os valores de referência indicados pela Norma.

A NBR 10152/2017 Versão Corrigida:2020 associa o atendimento às normas NBR 10151/2019 Versão Corrigida:2020 e NBR 15575/2013 à qualidade acústica do ambiente interno, indicando que, se há cumprimento dos valores dos níveis de pressão sonora equivalentes ponderada em A externos à edificação – determinados pela NBR NBR 10151/2019 Versão Corrigida:2020 – e, igualmente, estão sendo cumpridos os valores especificados pela NBR 15575/2013 para desempenho dos sistemas construtivos, logo, serão cumpridos os valores estabelecidos pela NBR 10152/2017 Versão Corrigida:2020. A associação das três Normas tem por consequência direta uma melhor definição das responsabilidades dos atores envolvidos no processo: vizinhos (emissores), construtores (trajetória) e moradores (receptores).

A parte 4 da NBR 15575/2013 apresenta os critérios para a verificação do isolamento acústico entre o meio externo e o interno a fim de classificar o desempenho de sistemas de vedações verticais em unidades habitacionais. A

diferença padronizada de nível ponderada mínima da vedação externa, que representa o isolamento aos ruídos aéreos medido no campo, pode ser vista na Tabela 1 (ABNT, 2013).

Tabela 1 - Diferença padronizada de nível ponderada da vedação externa para ensaios de campo

Classe de ruído	Localização da habitação	Diferença padronizada de nível ponderada (dB)	Nível de desempenho
I	Habitação localizada distante de fontes de ruído intenso de quaisquer naturezas	≥20	Mínimo
		≥25	Intermediário
		≥30	Superior
II	Habitação localizada em áreas sujeitas a situações de ruído não enquadráveis nas classes I e III	≥25	Mínimo
		≥30	Intermediário
		≥35	Superior
III	Habitação sujeita a ruído intenso de meios de transporte e de outras naturezas, desde que conforme a legislação.	≥30	Mínimo
		≥35	Intermediário
		≥40	Superior

Fonte: Adaptado de ABNT (2013)

Os procedimentos normatizados pela NBR 10152/2017 Versão Corrigida:2020 incluem o ajuste do sonômetro, a avaliação das condições ambientais sob as quais serão realizadas as medições, as posições dos pontos de medição e os tempos de medição e de integração de cada medição (ABNT, 2020b).

Através dos procedimentos descritos pela NBR 10152/2017 Versão Corrigida:2020, pode-se determinar a curva de avaliação de ruído representativo de um ambiente (LNC), comparando-a às curvas de avaliação de ruído (*Noise Criterion* - NC) incluídas no anexo D da referida norma, que estabelecem parâmetros mínimos de pressão sonora no interior dos ambientes, distinguindo esses ambientes por uso.

As curvas NC estabelecem os limites para obtenção de condições satisfatórias para comunicação através da fala no interior dos ambientes, nas diversas bandas de frequência de oitava. Assim, um conjunto de curvas é fornecido juntamente com um número atribuído a cada uma – NC30, NC35, NC40, etc. (Ayr *et al*, 2003). Esse método foi desenvolvido por Beranek (1957) e é adaptado na NBR 10152 (2020b), que apresenta diversas finalidades de uso para ambientes internos e a curva NC correspondente às condições mínimas de conforto acústico, conforme

pode ser visto na Tabela 2 e na Figura 1. A NBR 10152 (2020b) admite uma tolerância de 5 dB(A).

Tabela 2 - Valores de referência para ambientes internos de acordo com seu uso

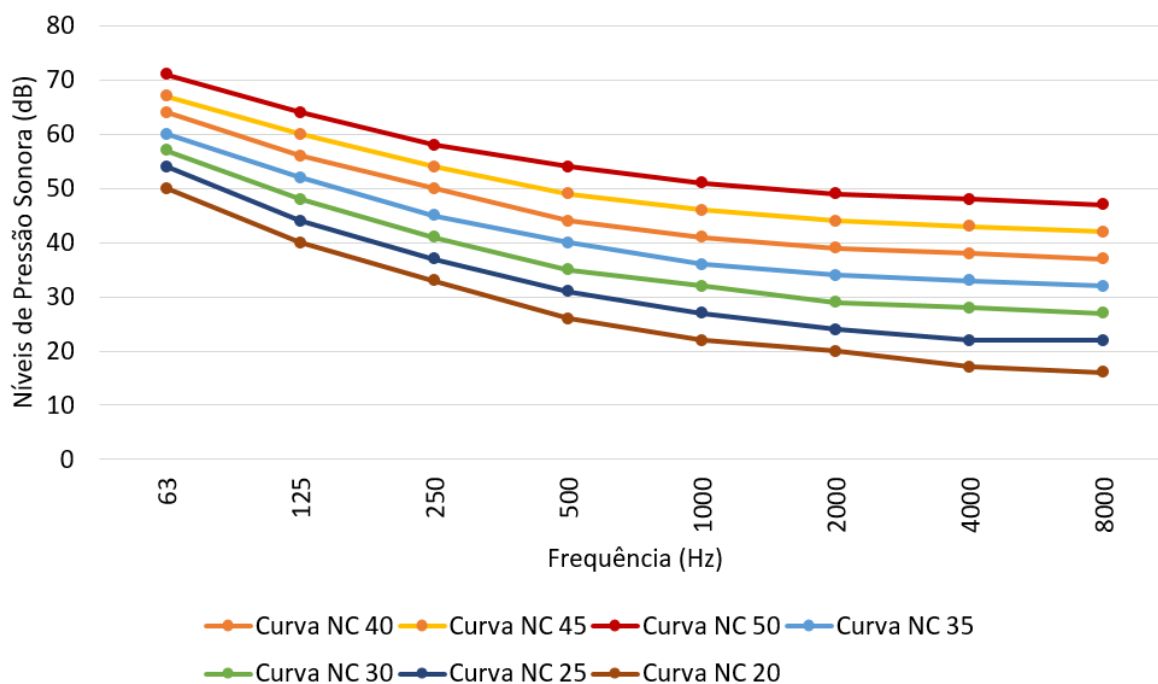
Finalidade de uso	Curva NC
Aeroportos, estações rodoviárias e ferroviárias	
Áreas de <i>check-in</i> , bilheterias	40
Salas de embarque e circulações	45
Centros comerciais	
Circulações	45
Lojas	40
Praças de alimentação	45
Garagens	50
Clínicas e hospitais	
Berçários	30
Centros cirúrgicos	30
Consultórios	30
Enfermarias	35
Laboratórios	40
Quartos coletivos	35
Quartos individuais	30
Salas de espera	40
Culturais e Lazer	
Salões de festa	35
Restaurantes	40
Cinemas	40
Salas de concertos	25
Teatros	25
Templos religiosos pequenos (< 600m ³)	35
Templos religiosos grandes (> 600m ³)	30
Bibliotecas	35
Museus (exposições)	35
Estúdios de gravação audiovisual	20
Educacionais	
Circulações	45
Berçários	35
Salas de aula	30
Salas de música	30

**Tabela 2 – Valores de referência para ambientes internos de acordo com seu uso
(Continuação)**

Escritórios	
Centrais de telefonia (<i>call centers</i>)	45
Circulações	45
Escritórios privativos (gerência, diretoria, etc.)	35
Escritórios coletivos (<i>open plan</i>)	40
Recepções	40
Salas de espera	40
Salas de reunião	30
Salas de videoconferência	35
Esportes	
Ginásio de esportes e academias de ginástica	40
Hotéis	
Quartos individuais ou suítes	35
Salões de convenções	35
Áreas de serviço	45
Circulações	40
Residências	
Dormitórios	30
Salas de estar	35
Salas de cinema em casa (<i>home theaters</i>)	35
Outros	
Auditórios grandes (> 600m ³)	25
Auditórios pequenos (< 600m ³)	30
Cozinhas e lavanderias	45
Tribunais	35

Fonte: Adaptado de ABNT (2017a)

Figura 1 – Curvas de avaliação de ruído NC



Fonte: Adaptado de ABNT (2017a)

É importante manter níveis de ruído aceitáveis dentro das edificações para que o indivíduo possa exercer suas atividades. Os ocupantes não podem ser prejudicados por ruídos, sejam eles aéreos – provenientes de vizinhos ou do exterior da edificação – ou de impacto – propagados pela estrutura do edifício. Os componentes estruturais, a localização da edificação e a qualidade e disposição das aberturas vão definir o nível de conforto acústico dos ambientes internos.

2.2 CÂMARAS CLIMÁTICAS

Muitos estudos de conforto ambiental são feitos em ambientes reais. Wyon (2004) demonstrou que experimentos deste tipo podem apresentar resultados diferentes daqueles desenvolvidos em laboratório ou com simulações.

Porém, estudos desenvolvidos em laboratórios também têm relevância no campo do conforto ambiental. P. Ole Fanger, um dos precursores desse tipo de abordagem, trabalhou com câmaras climáticas nos Estados Unidos e Dinamarca, onde implantou a primeira câmara climática voltada ao estudo de conforto térmico (LANGKILDE, 2010).

Com 16m² de área interna, a câmara de P. Ole Fanger era equipada com sistema de ar condicionado, controle de temperatura do ar, temperatura radiante média, umidade relativa e velocidade do ar. Seus estudos tiveram grande importância para a determinação de índices de conforto térmico, como o PMV e o PPD, visto que a primeira versão das normas ISO 7730/1984 e ASHRAE 55-1992 tiveram como base os estudos desenvolvidos por Fanger em câmaras climáticas (FANGER, 1970).

Câmaras climáticas ou ambientais podem ser definidas como volumes fechados com controle de variáveis internas. Dependendo do seu uso, podem ser de grande ou pequeno porte, montadas *in loco* ou pré-fabricadas, expostas às condições externas ou instaladas no interior de edificações (CGCRE, 2013).

Diversas funções podem ser designadas às câmaras climáticas, como, por exemplo, estudos no campo da agricultura (PIMENTEL *et al.*, 2005), pecuária (BLATCHFORT *et al.*, 1978), aeronáutica (DRAKE, 1985) e metabolismo humano (SCHOFFELEN *et al.*, 1997).

Na área de conforto, as câmaras permitem ao pesquisador ter o controle de variáveis ambientais (temperatura do ar, a temperatura radiante, a umidade relativa e a velocidade do ar, por exemplo) e pessoais (como temperatura corporal e pressão arterial). Estes ambientes também permitem ao pesquisador simular diversas situações de conforto ou estresse térmico ao usuário (CARVALHAIS, 2011).

Com isso, o estudo da qualidade de ambientes internos em câmaras possibilita o desenvolvimento de pesquisas no campo de qualidade do ar interno, conforto térmico, consumo de energia, acústica, comportamento da envoltória, saúde e produtividade (TOFTUM *et al.*, 2004).

2.2.1 Câmaras Expostas às Condições Externas

No campo que estuda o desempenho da envoltória de edifícios, destaca-se o PASSYS Project (*Passive Solar Components and Systems Testing*). Este projeto teve início em 1985 na Europa como um esforço para aumentar a confiança na aplicação de energia renovável e no desenvolvimento de produtos para construções passivas. Para tal, o projeto conta com células teste (Figura 2) com variáveis controladas para avaliar a eficiência de elementos da envoltória de edifícios. As

células teste contam com elevado isolamento térmico e possuem faces removíveis para a instalação dos componentes a serem testados. (BAKER *et al.*, 2008)

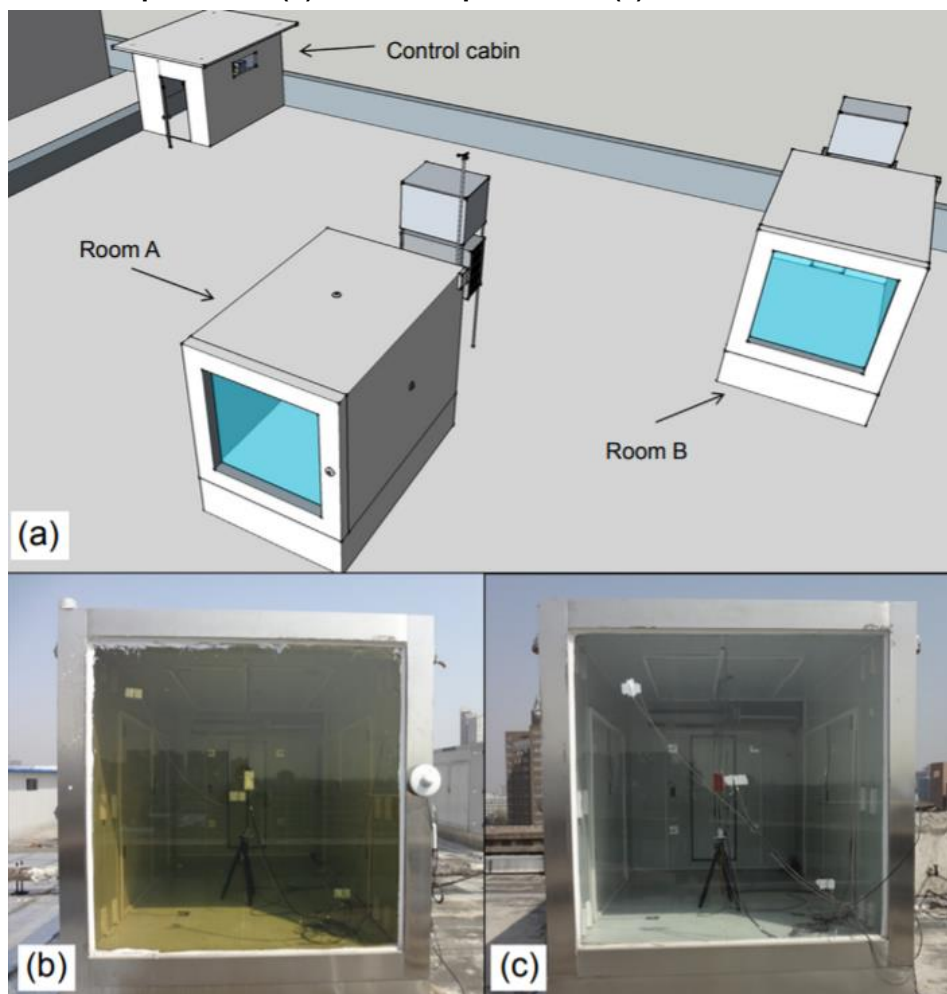
Figura 2 - Célula teste PASSYS Project



Fonte: Strachan, Vandaele (2008)

Outra instalação voltada ao estudo da envoltória é a *Testing and Demonstration Platform for Building Energy Research* (Figura 3) localizada no *campus* da Universidade de Ciência e Tecnologia da China, na cidade de Hefei. Esta câmara é composta por dois módulos idênticos com dimensões de 2,9m x 1,8m x 1,8m (C x L x H) e foi instalada na cobertura de um edifício de seis andares para evitar as sombras dos edifícios vizinhos. Durante os experimentos um módulo pode ser caracterizado como módulo de controle enquanto o outro recebe o material ou o componente a ser testado. Cada módulo possui paredes, piso e teto de poliuretano revestido por painéis metálicos com espessura total de 0,1m. A face sul dos módulos é composta por uma cortina de vidro. A temperatura interna é controlada por uma cabine de controle com a ajuda de equipamentos de ar condicionado (YE *et al.*, 2013; LONG *et al.*, 2014; LONG *et al.*, 2016).

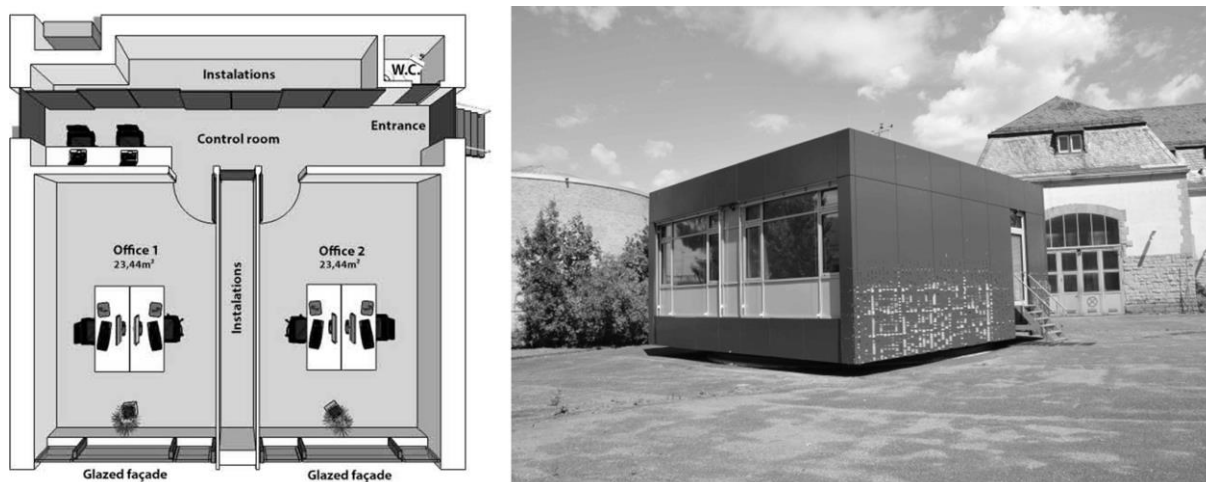
Figura 3 – *Testing and Demonstration Platform for Building Energy Research*. (a): Diagrama esquemático. (b): Módulo experimental. (c) Módulo controle.



Fonte: Long *et al.* (2016)

Relativo ao conforto térmico, destaca-se o LOBSTER (*Laboratory for Occupant's Behaviour, Satisfaction, Thermal Comfort, and Environmental Research*). Esta câmara climática foi criada na Alemanha em 2013 e é composta por dois ambientes de teste com 3,90m × 6,00m e uma sala de controle (Figura 4). O conjunto possui um sistema de rotação que permite estudos de incidência solar, alterando a orientação da fachada envidraçada. Estudos desenvolvidos neste laboratório verificam o conforto adaptativo e o comportamento do usuário frente a diversas variáveis (KRÜGER *et al.*, 2017; SCHWEIKER *et al.*, 2014).

Figura 4 - LOBSTER



Fonte: Krüger et al. (2017)

2.2.2 Câmaras Instaladas no Interior de Edificações

A câmara climática do *Center for Energy and Environmental Resources* na *University of Texas in Austin* contribui em estudos sobre a qualidade do ar por meio de sua célula teste de 1,80m × 2,40m × 2,50m (largura, profundidade, altura) que pode contar partículas suspensas no ar e contabilizar a concentração de determinados gases. Na mesma universidade, o *Building Energy and Environments Department* possui outra câmara climática (Figura 5), maior e com controle de fluxo de ar, temperatura do ar e umidade relativa (UTA, 2019).

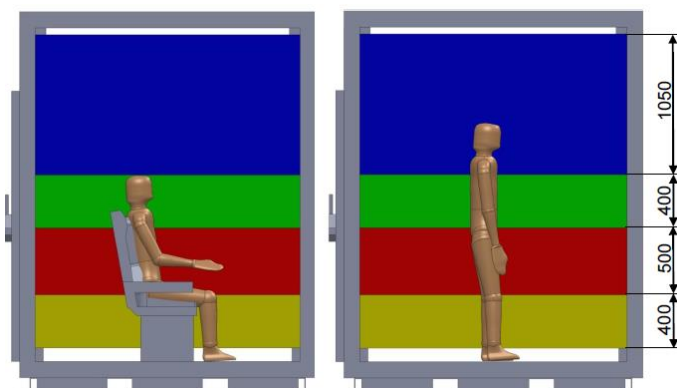
Figura 5 - Câmara do *Building Energy and Environments Department*



Finte: UTA (2019)

Na área do conforto térmico, o *Aachen Comfort Cube* (Figura 6), na Alemanha, é uma câmara com área de piso de 2m × 2m e altura de 2,5m. Três das quatro paredes deste ambiente são divididas em segmentos. O primeiro e o terceiro segmento têm 40cm de altura, o segundo tem 50cm e o quarto 105cm. O teto, o piso e cada um dos segmentos podem ser configurados com uma temperatura diferente, entre 15°C e 40°C, por meio de tubos com água quente ou fria no interior das placas (MÖHLENKAMP *et al.*, 2016).

Figura 6 - *Aachen Comfort Cube*



Fonte: Möhlenkamp *et al.* (2016)

O *International Centre for Indoor Environment and Energy* (ICIEE), criado em 2001 na *Technical University of Denmark* (DTU), é um dos maiores centros de pesquisa de conforto ambiental em ambientes laboratoriais e possui seis câmaras

climáticas além de diversos espaços dedicados a pesquisas ligadas ao conforto, saúde, eficiência energética e produtividade (TOFTUM *et al.*, 2004).

As câmaras climáticas têm, portanto, grande importância no estudo de conforto ambiental e qualidade do ambiente interno, sendo utilizadas em importantes pesquisas nos campos do conforto ambiental (SCHWEIKER *et al.*, 2014; MÖHLENKAMP *et al.*, 2016; KINGMA *et al.*, 2017; KRÜGER *et al.*, 2017; PALLUBINSKY *et al.*, 2017), da avaliação de desempenho da envoltória de edifícios (BAKER *et al.*, 2008; MC NEIL *et al.*, 2014; REGNIER *et al.*, 2016), do estudo do metabolismo humano (SCHOFFELEN *et al.*, 1997; WIJERS *et al.*, 2012) e também no desenvolvimento de novos compostos químicos (SARWAR *et al.*, 2003) principalmente na Europa e na América do Norte.

2.3 JANELAS: CARACTERIZAÇÃO E ESTUDOS

A função primordial das edificações é proporcionar abrigo e segurança aos seus habitantes (DE BOTTON, 2007). As janelas têm uma função de destaque no provimento de conforto térmico e visual de uma edificação (GUSTAVSEN *et al.* 2007). Esses elementos são também importantes no desenvolvimento do partido arquitetônico² à medida em que contribuem com a estética do edifício (SILVA, 1998).

Superfícies envidraçadas podem ocupar espaços significativos nas fachadas das edificações desvinculando-se da estrutura e formando cortinas de vidro, que são grandes panos de vidro que não suportam nenhum esforço estrutural além do seu próprio peso (MEMARI, 2013).

O desenvolvimento da tecnologia do vidro e dos perfis de esquadrias deu maior liberdade formal ao arquiteto. Nesse sentido, Juhani Pallasmaa (2018) reflete que as aberturas ultrapassam a função básica de proporcionar luz e ventilação naturais ao usuário, fazendo parte da experiência arquitetônica com a função maior de conectar o habitante ao mundo externo.

Kido e Cywiński (2017) atestam que os atributos do vidro têm grande influência na percepção da arquitetura. Elementos em vidro transmitem sensação de espacialidade e leveza, podendo também apresentar uma grande variedade de

² Partido arquitetônico é o resultado formal da manipulação de uma série de condicionantes relacionadas ao projeto arquitetônico, tais como topografia, orientação, sistema estrutural, verba disponível, leis de uso do solo e intenção plástica do arquiteto (SILVA, 1998).

texturas, cores e diferentes níveis de refletância. Segundo os autores, a expressividade do vidro influencia diretamente a percepção de valor de um empreendimento.

Pelo fato de muitas vezes constituírem grande parte da envoltória, as aberturas acabam tendo um grande destaque tanto na composição arquitetônica das fachadas quanto no desempenho energético das edificações. Geralmente, a transmitância térmica de janelas é maior do que a de outros elementos da envoltória, permitindo maior troca de calor entre o ambiente interno e externo (GUSTAVSEN *et al.*, 2007).

Cabe aqui pontuar que a envoltória de um edifício, segundo Sadineni *et al.* (2011), consiste no conjunto de elementos – como paredes, aberturas, telhado, fundação e sistemas de sombreamento – que separa o ambiente interno do externo, tendo papel fundamental na qualidade e controle das condições do ambiente interno.

A eficiência energética de um edifício pode ser aprimorada com a implementação de estratégias de eficiência energética ativas ou passivas. Melhorias nos sistemas mecânicos de aquecimento, ventilação e ar condicionado, assim como substituição de iluminação artificial de baixa eficiência, são caracterizadas como estratégias ativas. Já o aperfeiçoamento dos elementos da envoltória do edifício é considerado uma estratégia passiva. Abordagens passivas de eficiência energética têm sido incentivadas pois entende-se que elas representam uma solução viável para a crise energética e para o aumento da poluição ambiental (SADINENI *et al.*, 2011).

2.3.1 Normatização

As esquadrias são normalizadas pela NBR 10821 - Esquadrias externas para edificações (ABNT, 2017). Em suas cinco partes, a referida norma trata da terminologia de esquadrias internas e externas, requisitos e classificação, métodos de ensaio, requisitos adicionais de desempenho e instalação e manutenção de esquadrias.

Dependendo da matéria-prima constituinte da esquadria, devem ser inclusas outras normas. Para janelas fabricadas em aço inoxidável, deve ser seguida a NBR

10821-2/2017. Perfis de alumínio devem respeitar as normas NBR 12609/2017 e NBR 14125/2016. Quando feitas com PVC, as janelas necessitam atender os requisitos da EN 12608-1/2016, que trata da qualidade da matéria-prima empregada na fabricação das esquadrias, bem como do processo de extrusão dos perfis.

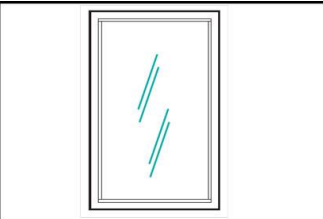
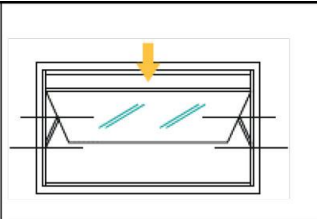
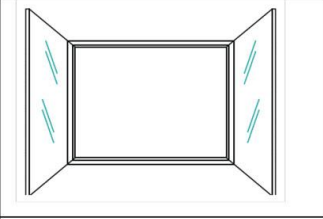
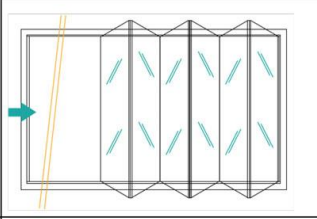
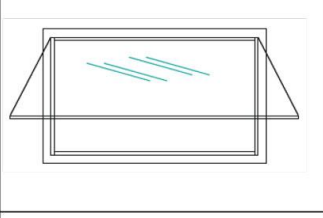
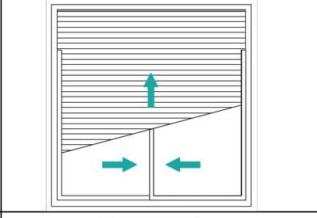
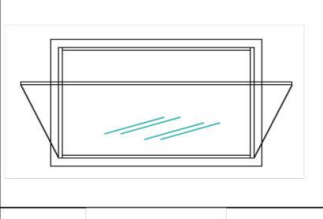
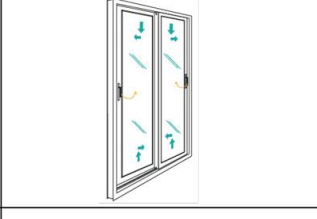
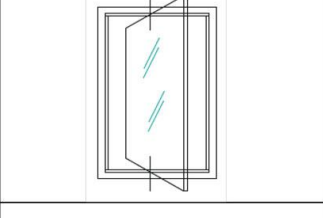
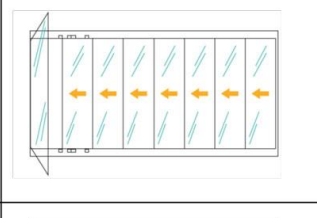
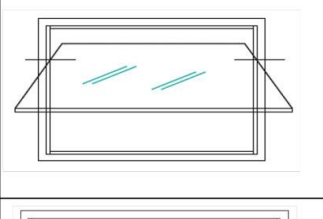
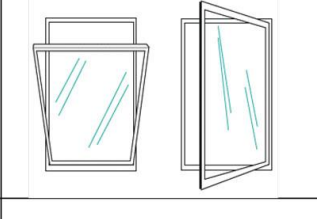
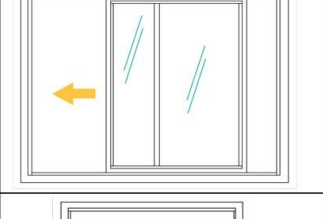
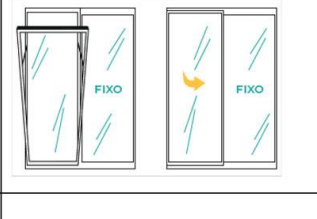
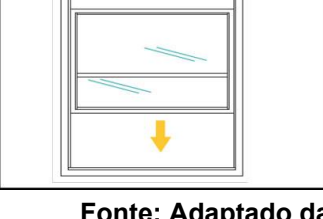
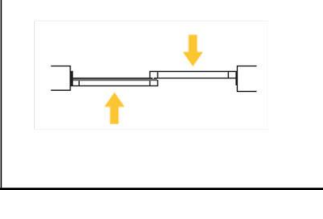
Todas as aplicações de vidros na construção civil devem atender o que determina a ABNT NBR 7199/2016 – Vidros na construção civil – Projeto, execução e aplicações, para garantir a segurança dos usuários.

2.3.2 Sistemas de Esquadrias

Esquadrias são elementos utilizados para o fechamento de aberturas em edificações e, segundo a NBR 10821-1/2017, compreendem portas, janelas, claraboias e fachadas-cortina, podendo ser classificadas quanto ao seu sistema de funcionamento, conforme Tabela 3.

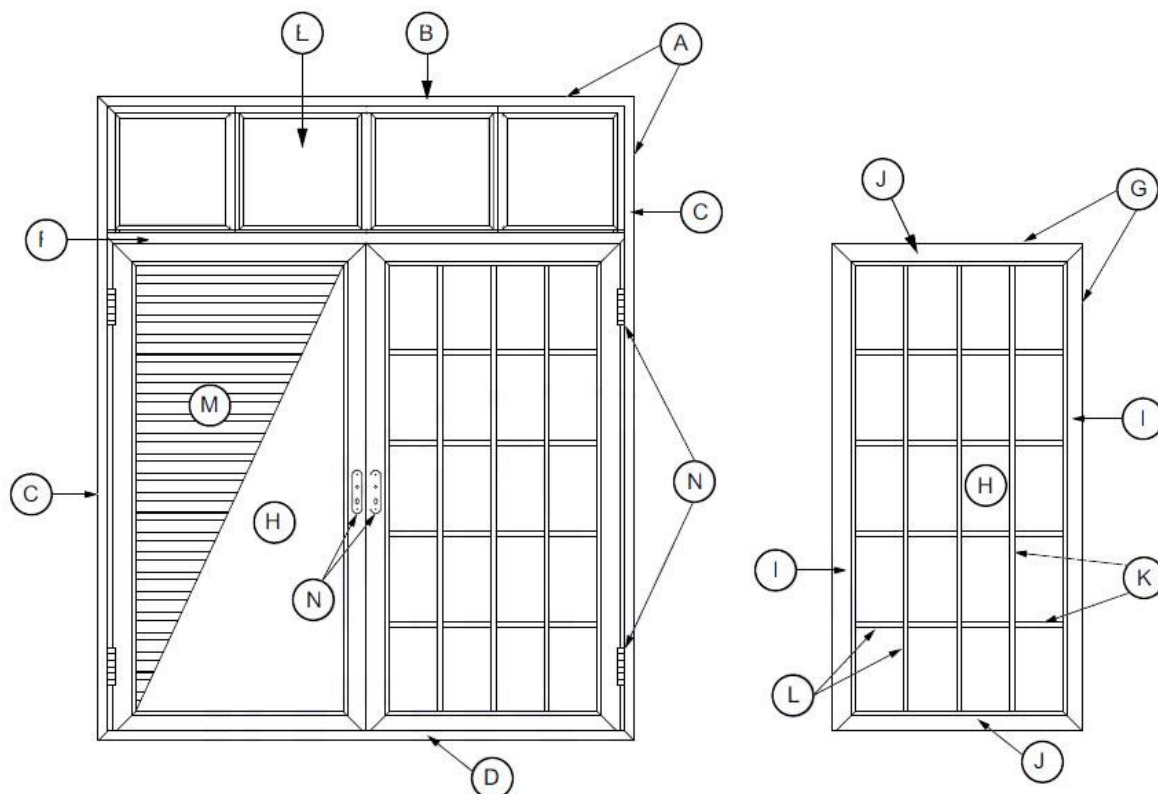
Em janelas, os sistemas de esquadrias são as molduras dos vidros, ou seja, são os perfis que permitem a abertura de panos de vidro, fixando esse elemento a outros materiais, como alvenaria (JELLE *et al.*, 2011). Os elementos que compõe os sistemas de esquadrias podem ser vistos na Figura 7.

Tabela 3 - Classificação de esquadrias quanto ao seu funcionamento

Esquadria de folha fixa		Esquadria projetante-deslizante (maxim-ar)	
Esquadria de giro, de eixo vertical		Esquadria sanfona (camarão)	
Esquadria projetante		Esquadria integrada	
Esquadria de tomar		Janela alçante (elevadora)	
Esquadria pivotante		Janela de correr com giro	
Esquadria basculante		Janela de girar e tomar (oscilo batente)	
Esquadria de correr		Janela de correr paralela e de tomar	
Esquadria guilhotina		Janela de correr com compressão transversal ao plano de movimentação	

Fonte: Adaptado da NBR 10821-1 (2017)

Figura 7 – Componentes dos sistemas de esquadrias



Legenda

A	contramarco	H	pano
B	travessa superior do marco	I	montantes
C	ombreira do marco	J	travessas
D	peitoril do marco	K	pinázios
E	bandeira	L	baguetes
F	travessa intermediária	M	veneziana/pano tipo veneziana
G	folha	N	componentes

Fonte: NBR 10821-1 (2017)

Os avanços tecnológicos dos sistemas de esquadrias visam minimizar as pontes térmicas e as perdas por infiltração e também buscam melhorar a estanqueidade acústica das janelas. Gustavsen *et al.* (2007) comprovaram que o efeito da eficiência dos sistemas de esquadrias é melhor percebido em janelas de pequenas dimensões. Para explicar a razão disso, os autores citam que em uma janela com dimensões finais de 1,20m × 1,20m e com perfis de 0,10m em sua borda, a área ocupada pelos perfis corresponde a 30% do total. Em uma janela de 2m × 2m

utilizando o mesmo perfil, essa porcentagem cai para 19%. Isso exemplifica a importância dos sistemas de esquadrias na eficiência de uma janela, especialmente quando os perfis têm uma transmitância térmica maior do que a do vidro.

As esquadrias podem ser compostas por diferentes materiais, sendo que os mais utilizados no Brasil são o alumínio, o aço, o PVC e a madeira (CBIC, 2017).

2.3.2.1 Esquadrias de aço

A resistência do aço é a principal vantagem da utilização desse material em esquadrias pois garante grande versatilidade de uso, uma vez que permite o desenvolvimento de projetos praticamente sem restrições de vãos. Com o aço, os perfis tornam-se esbeltos, garantindo leveza ao conjunto e versatilidade ao projetista (CBIC, 2017).

Alguns materiais, como cobre e zinco, podem ser adicionados à liga de aço para melhorar sua resistência à corrosão. O tratamento superficial dos perfis também garante melhor resistência ao conjunto por meio da fosfatização da ou pintura de acabamento anticorrosão (CBIC, 2017).

2.3.2.2 Esquadrias de alumínio

O alumínio possui uma resistência natural à corrosão, é um material leve e estrutural com baixa manutenção e longa vida útil. Sua maleabilidade permite a fabricação de esquadrias em todas as tipologias, sendo que a indústria de perfis de esquadrias em alumínio é a mais desenvolvida do Brasil (CBIC, 2017).

Esquadrias desse material apresentam diversos acabamentos. Os mais comuns são a anodização e a pintura. A anodização é um processo eletrolítico que forma uma camada de óxido de alumínio na superfície dos perfis metálicos e a camada anódica deve ter espessura compatível com a agressividade do ar de acordo com a localização da edificação. A pintura pode ser feita com tinta líquida ou com tinta a pó eletrostaticamente com espessura variando entre 60 e 110 micrômetros (ABNT, 2016).

2.3.2.3 Esquadrias de PVC

Devido às características do material e ao processo de fabricação dos perfis, as esquadrias de PVC apresentam excelente desempenho quando submetidas aos ensaios especificados pelas normas brasileiras e internacionais, destacando-se principalmente pelo desempenho acústico e térmico. Além disso, o PVC apresenta alta resistência química à agressão de outros materiais encontrados em construções e não está sujeito à corrosão (CBIC, 2017).

O PVC é produto de grande versatilidade e resistência, além de ser 100% reciclável. Os perfis feitos com esse material contam com aditivos que lhes conferem maior resistência mecânica e podem possuir reforços metálicos internos. Esse material não necessita de nenhuma camada de acabamento, portanto, as esquadrias de PVC disponíveis no mercado têm acabamento natural, geralmente em cores claras (CBIC, 2017).

2.3.2.4 Esquadrias de madeira

Dentre os materiais que podem ser usados para a manufatura de perfis de esquadrias, a madeira é o único material 100% renovável. As tecnologias e os processos de engenharia aplicados à fabricação de esquadrias de madeira, como a secagem e a reconstituição da matéria-prima pela seleção e colagem das peças, elevam o grau de resistência da madeira, seu desempenho e sua durabilidade (CBIC, 2017).

Para o uso externo, as peças de madeira devem receber acabamento especial com resistência às intempéries, que pode ser resina à base d'água ou resina sintética (NBR 10921/2017).

2.3.3 Vidros

A cadeia produtiva do vidro começa com a extração dos minerais que abastecem as usinas. A partir daí as fábricas iniciam a produção das chapas de

vidros planos em dimensões padronizadas nas tonalidades incolor, verde, bronze e cinza e em espessuras entre 2 e 25mm (WESTPHAL, 2016).

O processo de fabricação do vidro comum pode ser dividido em cinco etapas. Primeiramente, é feita a mistura dosada das matérias-primas para. Em uma segunda etapa, a composição é enviada aos fornos para ser fundida a 1.600°C em um processo lento e controlado. Então, a massa de vidro fundido é colocada em uma piscina de estanho a 650°C formando uma lâmina de vidro. Após esta etapa, a lâmina é recozida em um forno que resfria a chapa de forma controlada. Finalmente, a lâmina de vidro é inspecionada e cortada em chapas (WESTPHAL, 2016).

No Brasil, os vidros *float*, impresso, serigrafado, temperado, laminado, aramado, insulado e vidros de controle solar são os mais aplicados na construção civil. Existem no mercado outros vidros com características específicas para uma determinada aplicação, como vidros autolimpantes e antibactérias, porém, têm um uso muito restrito (WESTPHAL, 2016).

2.3.3.1 Vidro *float*

O vidro *float* é o vidro comum, totalmente transparente, de superfícies polidas e paralelas. Se mostra ideal para aplicações que exijam perfeita visibilidade e alta transmissão de luz. Ele é usado como matéria-prima na fabricação de diversos outros vidros, podendo ser laminado, temperado, insulado ou serigrafado (WESTPHAL, 2016).

2.3.3.2 Vidro impresso

O impresso, conhecido também como vidro fantasia, é produzido passando-se uma tira de vidro fundido entre rolos a 900°C. Dessa forma, desenhos em relevo nos rolos são transferidos ao vidro. Ou seja, em sua fabricação, são utilizadas as mesmas matérias-primas e insumos básicos empregados no processo do vidro *float*. A diferença está na utilização de dois cilindros metálicos na saída do forno em que passa o vidro já elaborado (massa fundida). O rolo superior é liso e o inferior detém em sua superfície a gravação do desenho (padrão) que se deseja imprimir no vidro,

sendo que o espaçamento entre os dois rolos determina a espessura do produto acabado (CBIC, 2017).

Após a impressão, o vidro plano, que ainda não está completamente rígido, é conduzido por um conjunto de rolos chamado de estenderia, para um local no qual ocorre o seu processo de resfriamento de maneira lenta e gradual. Em seguida, o vidro é cortado em chapas, nos tamanhos programados. O impresso pode receber beneficiamentos como laminação, têmpera, espelhamento, jateamento e bisotê (CBIC, 2017).

Uma das principais características do vidro impresso são os desenhos suaves e uniformes que têm a propriedade de difundir a luz e os raios solares, mantendo a privacidade dos ambientes sem perder luminosidade. Com variedade de texturas, cores e espessuras, o impresso proporciona variados efeitos decorativos, privacidade e conforto. Também pode ser usado para o processamento de todos os demais vidros: temperados, laminados, curvos, entre outros (CBIC, 2017).

2.3.3.3 Vidro serigrafado

Esse tipo de vidro recebe pintura com tinta cerâmica e, posteriormente, é submetido ao processo de têmpera, onde a tinta se funde ao vidro de forma permanente. As chapas podem ser serigrafadas com uma cor homogênea ou receber desenhos e texturas que ajudam a sombrear o ambiente interno (WESTPHAL, 2016).

A serigrafia é utilizada em vidros de fachadas e de coberturas com o objetivo de controlar a entrada de luz e calor ou para garantir privacidade do ambiente interno.

2.3.3.4 Vidro temperado

O vidro temperado é cerca de seis vezes mais resistente do que um vidro *float* de mesma espessura. Quando quebrado, ele gera fragmentos pequenos que são menos propensos a causar ferimentos graves. Pode ser classificado como um vidro de segurança, desde que atenda aos requisitos da norma brasileira NBR 14698/2001.

O processo de produção de vidro temperado envolve seu aquecimento a mais de 600°C seguido de um resfriamento rápido que estabelece um estado de compressão na superfície do vidro e de tração no núcleo. Após o processo de têmpera, o vidro não pode sofrer corte ou ser usinado (WESTPHAL, 2016).

2.3.3.5 Vidro laminado

O vidro laminado é composto por duas ou mais chapas de vidro ligadas pelo aumento de temperatura e pressão por uma ou mais camadas de material plástico, que pode ser PVB (Polivinil Butiral), EVA (Etil Vinil Acetato) ou resina (WESTPHAL, 2016).

Esse vidro também pode ser considerado vidro de segurança, uma vez que, quando quebradas, as chapas de vidro tendem a permanecer coladas ao material plástico, reduzindo o risco de lesões (WESTPHAL, 2016).

Os vidros laminados podem ser compostos por vidros *float* ou vidros temperados, aumentando, desta forma, a resistência do conjunto ao impacto.

2.3.3.6 Vidro aramado

É obtido por meio da fundição de uma malha de aço que se incorpora ao vidro, garantindo maior resistência a impactos. É um vidro de segurança pois, em caso de quebra, os pedaços de vidro ficam presos à rede metálica (WESTPHAL, 2016).

2.3.3.7 Vidro insulado

O vidro insulado é composto por duas ou mais chapas de vidro, unidas hermeticamente em suas bordas, porém separadas por uma câmara oca, que pode ser preenchida com ar ou com gás desidratado, proporcionando maior isolamento térmico e acústico (WESTPHAL, 2016).

2.3.3.8 Vidro de controle solar

Esse tipo de vidro possui um tratamento superficial feito com revestimento metálico que é imperceptível a olho nu mas deixa o vidro mais reflexivo, minimizando o ganho solar e filtrando parte do espectro de luz. Assim, esses vidros podem proporcionar um baixo ganho de calor por radiação solar enquanto permitem a passagem de luz, contribuindo para o conforto ambiental e eficiência energética nas edificações (WESTPHAL, 2016).

O vidro é um componente fundamental para o atendimento das exigências da classificação das esquadrias, propostas pela NBR 10821-4/2017. Vidros insulados, serigrafados e de controle solar podem cooperar para uma maior eficiência energética e melhoria da qualidade do ambiente interno.

Segundo Jelle *et al.* (2011), o vidro pode ser considerado o elemento mais importante da janela, especialmente porque constitui a maior parte da abertura e tem grande interferência na transmitância térmica total do conjunto. Nesse sentido, significativos avanços têm sido feitos na tecnologia de vidros, possibilitando maior iluminação com menores ganhos energéticos através de vidros que reduzem a penetração da radiação solar nos ambientes.

Pacheco *et al.* (2012), atestam que tais vidros são mais eficientes no verão, a medida em que reduzem a demanda por resfriamento do ambiente. Por outro lado, no inverno esse tipo de vidro dificulta o uso da energia solar para aquecimento passivo.

O desenvolvimento de vidros que reduzem a captação de radiação solar não deve afetar a transparência da abertura, uma vez que isso diminuiria a iluminação passiva e aumentaria o consumo energético por parte da iluminação artificial. (PACHECO *et al.*, 2012)

2.3.4 Estudos sobre eficiência de janelas

Apresenta-se a seguir uma breve revisão bibliográfica de estudos referentes à eficiência de janelas que se relacionam com os objetivos deste trabalho.

Oliveira (2007), buscou uma alternativa para melhorar o isolamento acústico de aberturas de edificações já existentes por meio da duplicação de janelas,

sobrepondo uma nova janela à existente, mantendo uma camada de ar entre ambas. Primeiramente, Oliveira (2007) duplicou janelas de correr com baixa estanqueidade para, então, duplicar janelas máximo-ar – com boa estanqueidade- comparando o desempenho da técnica nas duas situações.

Nos ensaios conduzidos por Oliveira (2007), constatou-se que a duplicação de janelas de correr simples leva a um ganho de isolamento de 8dB. Porém, este ganho não é suficiente para que o sistema de janelas duplicadas atinja o índice de isolamento sonoro de uma única janela com esquadria tipo máximo-ar. Segundo o autor, a duplicação de janelas máximo-ar oferece um ganho de isolamento de 8dB sobre o sistema de uma única janela.

O estudo ainda conclui que a duplicação de janelas de correr tem maior eficiência em ruídos de alta frequência. Já a duplicação de janelas máximo-ar tem maior eficácia em ruídos de baixas e médias frequências, como a poluição sonora causada por tráfego de veículos (OLIVEIRA, 2007).

A técnica experimentada por Oliveira (2007) configura-se como uma alternativa de baixo custo para reformas de edifícios existentes, maximizando o conforto acústico dos usuários.

A eficiência energética e o conforto térmico de edifícios antigos também podem ser melhorados por meio do *retrofit* ou substituição de janelas de baixo desempenho (AHN *et al.*, 2015).

Os estudos conduzidos por Ahn *et al.* (2015) se valeram de simulação computacional para estimar os ganhos de eficiência energética no caso de substituição de esquadrias antigas por novos elementos. Concluiu-se que o *retrofit* das janelas melhorou a performance da envoltória uma vez que diminuiu a transmitância térmica do conjunto e, conseqüentemente, diminuiu também o total de energia demandada para resfriar os ambientes internos. Essa diferença foi mais perceptível em edificações cuja envoltória é menos eficiente termicamente.

Mankibi *et al.* (2015) lembram que em edificações consideradas patrimônios históricos existe a premissa de se preservar a aparência e as características externas das fachadas. Em estudo envolvendo simulação computacional e experimentos em uma câmara de 3m³ (3m x 1m x 1m – C x L x H) os autores concluíram que o uso de janelas duplicadas é eficiente em resolver os problemas termoacústicos de edifícios antigos, preservando as janelas originais pelo lado de fora.

Sistemas de janela duplicada também podem ser usados para aperfeiçoar a ventilação de ambientes. Em muitos edifícios a ventilação mecânica torna-se inviável, seja pelo custo ou por dificuldades técnicas. Com isso, surge a necessidade de desenvolvimento de alternativas passivas para proporcionar ventilação natural sem prejudicar o conforto térmico (LIU *et al.*, 2017).

Janelas duplas ventiladas são um sistema passivo que usa a radiação solar e parte do calor perdido pelo ambiente interno para aquecer o ar externo captado para ventilação (CARLOS *et al.*, 2010). Comumente são compostas por duas janelas sobrepostas e separadas por uma cavidade ventilada. A janela externa possui aberturas em sua parte inferior e a interna em sua parte superior, permitindo, assim que o ar que circula na cavidade seja aquecido pela radiação solar. Janelas duplas ventiladas são usadas para minimizar a demanda energética para resfriamento ou aquecimento do ambiente interno melhorando o conforto por proporcionar temperaturas mais amenas e melhor qualidade do ar (LIU *et al.*, 2017).

O trabalho de Liu *et al.* (2017) traz uma investigação sobre o impacto de diferentes configurações de janela ventilada na otimização da eficiência energética e do conforto térmico em edificações de clima subtropical e temperado.

Liu *et al.* (2017) se valeram de simulações para testar quinze diferentes configurações de janelas ventiladas, variando o tipo de vidro, de películas refletivas e de câmaras insuladas. O estudo conclui que esse tipo de janela é eficiente na manutenção do conforto ambiental e na melhoria da eficiência energética.

Carlos *et al.* (2010) desenvolveram um extenso estudo sobre a eficiência de janelas duplas ventiladas utilizando um contêiner com 2,20m de comprimento por 2,00m de largura e altura de 2,50m. Diferentes tipos de janela foram instalados em uma abertura de 1,43 de altura por 1,00m de largura, possibilitando análises comparativas. As variáveis foram medidas por um anemômetro, um piranômetro e alguns termômetros dispostos interna e externamente.

O estudo estabelece que o sistema de janelas duplas ventiladas funciona como um trocador de calor, recuperando parte do calor perdido, e como coletor solar, permitindo a incidência solar direta no ambiente interno. Durante o período do experimento, a temperatura externa variou entre -6 d 16°C enquanto a temperatura interna manteve-se estável próxima a 20°C (CARLOS *et al.*, 2010).

Ainda na busca por melhores condições de qualidade do ar sem preterir o conforto térmico, Stazi *et al.* (2017) criaram um sistema automatizado para controlar

a abertura de janelas. Duas salas adjacentes de uma escola em Ancona, na Itália, foram monitoradas. Em uma delas as janelas eram operadas pelos usuários enquanto na outra o sistema automatizado foi testado. Questionários foram desenvolvidos e aplicados antes e depois do experimento para avaliar a percepção dos usuários quanto a qualidade do ar e ao conforto térmico.

Os resultados mostraram que os estudantes conviviam com a baixa qualidade do ar por causa da prioridade em satisfazer as percepções térmicas dentro das salas de aula. Assim, o sistema automatizado proporcionou um ambiente mais confortável pois a concentração de CO₂ permaneceu abaixo de 1500 ppm e a temperatura interna manteve-se constante, sem apresentar grandes quedas quando a janela era aberta e registrando a satisfação térmica dos usuários através do questionário. (STAZI *et al.*, 2017).

Entende-se, portanto, que a janela tem grande influência tanto no conforto termoacústico do ambiente interno (OLIVEIRA, 2007; JELLE *et al.*, 2011; PACHECO *et al.*, 2012) quanto na eficiência energética da edificação (GUSTAVSEN *et al.*, 2007; AHN *et al.*, 2015), uma vez que é responsável por grande parte das trocas de calor entre o ambiente interno e o exterior. Diversas técnicas para melhorar o desempenho de janelas estão sendo estudados e têm gerado resultados significativos (CARLOS *et al.*, 2010; LIU *et al.*, 2017; STAZI *et al.*, 2017), sendo que alternativas de baixo custo podem ser aplicáveis em edificações já existentes em centros urbanos, cuja poluição sonora e a economia de energia tem gerado preocupação aos habitantes e ao poder público (OLIVEIRA, 2007; AHN *et al.*, 2015).

3 METODOLOGIA

Esta pesquisa pode ser classificada como explicativa quanto aos seus objetivos, uma vez que busca identificar como as janelas contribuem para as condições de conforto ambiental da CBBC. Segundo Gil (2002), pesquisas explicativas têm como principal preocupação identificar os fatores que determinam ou que colaboram para ocorrência de determinado fenômeno. O autor indica que grande parte das pesquisas desse tipo podem ser classificadas como experimentais.

Pesquisas experimentais consistem em determinar um objeto de estudo, selecionar variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir meios de controle e posteriormente observar os efeitos que a variável produz no objeto (GIL, 2002).

Nesta pesquisa, após serem identificadas fragilidades no desempenho termoacústico da CBBC, procedeu-se à análise do tipo de janela deste ambiente, buscando identificar como a qualidade da abertura e sua orientação influenciam a performance da Câmara. Porém, a janela não é a única variável a impactar o presente estudo. As condições climatológicas são fatores importantes durante os procedimentos de coleta de dados, e sobre eles não se tem qualquer controle.

Assim, cabe ressaltar que neste trabalho não foi possível obter pleno controle sobre a aplicação de todos os estímulos experimentais. Por este motivo, seguindo o estipulado por Campbell e Stanley (1979), esta pesquisa não pode ser rigorosamente rotulada como experimental, devendo ser classificada como quase-experimental.

Segundo Gil (2002), a análise de dados em pesquisas experimentais ou quase-experimentais frequentemente configura uma pesquisa quantitativa, enquanto a abordagem qualitativa envolve obtenção de dados descritivos, contato direto do pesquisador com a situação e enfatiza mais o processo que o produto.

Entretanto, numa pesquisa científica, os tratamentos quantitativos e qualitativos dos resultados podem ser complementares, enriquecendo a análise e as discussões finais (MINAYO, 1997).

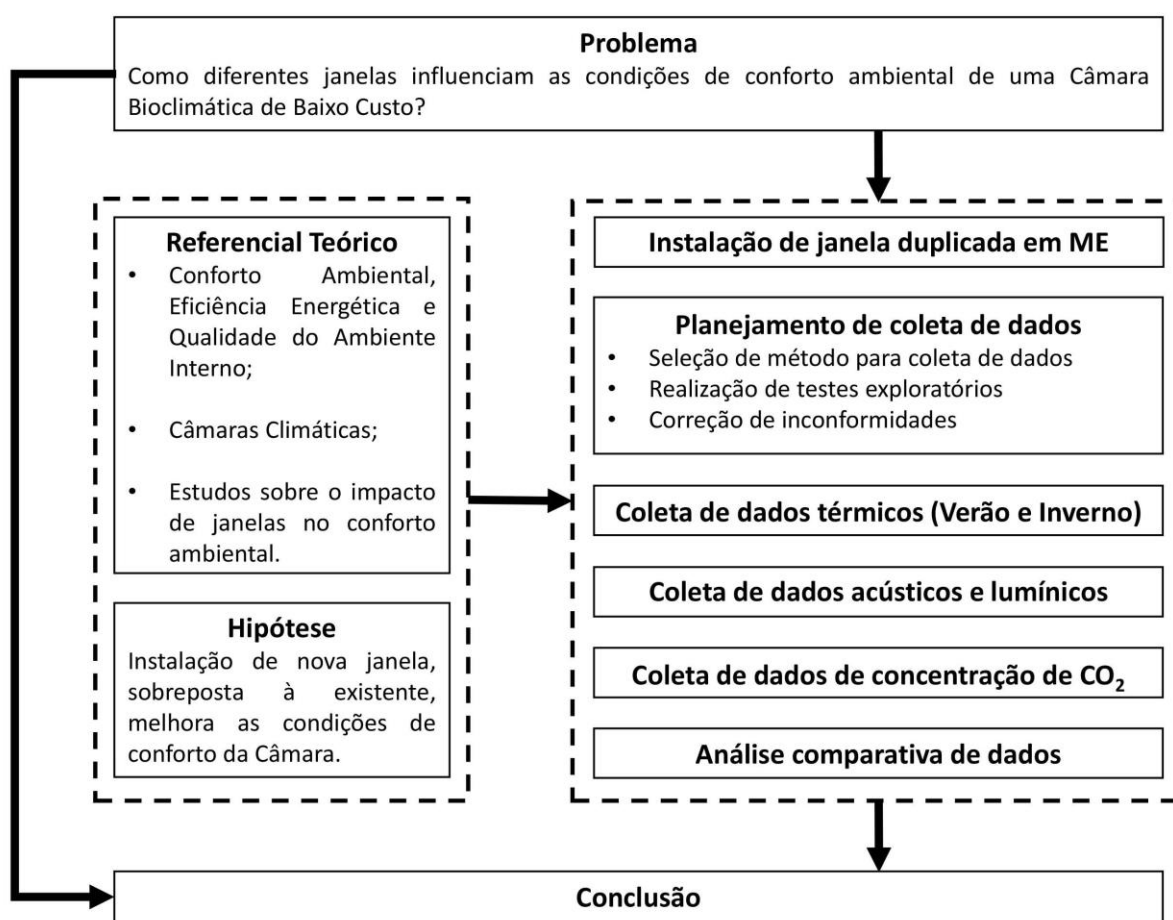
Nesta pesquisa o monitoramento de variáveis ambientais configura uma pesquisa quantitativa enquanto a análise comparativa dos dados assemelha-se a uma pesquisa qualitativa. Assim, do ponto de vista da abordagem do problema, esta pesquisa pode ser classificada como quali-quantitativa.

Quanto ao delineamento da pesquisa, inicialmente foi feita pesquisa bibliográfica baseada em livros e artigos científicos buscando maior familiaridade com o tema e identificando métodos a serem aplicados na coleta de dados. Nesta etapa também foram estabelecidos os limites da pesquisa. Assim foi elaborado o capítulo anterior, Referencial Teórico, discorrendo sobre conforto ambiental, eficiência energética e qualidade do ambiente interno, câmaras climáticas e estudos sobre eficiência termoacústica de janelas.

Simultaneamente, com base nos dados obtidos em estudo anterior (TREVISAN, 2019), verificou-se a ineficiência da janela instalada na CBBC e levantou-se a hipótese de que a instalação de nova janela, sobreposta à existente, poderia melhorar o desempenho termoacústico da Câmara.

Foram estipuladas as etapas da pesquisa como demonstrado na Figura 8.

Figura 8 - Etapas da pesquisa



Fonte: Autoria própria

3.1 OBJETO DE ESTUDO: CÂMARA BIOCLIMÁTICA DE BAIXO CUSTO (CBBC)

Em fevereiro de 2018, foi construída a Câmara Bioclimática de Baixo Custo (CBBC), para o estudo de conforto ambiental em Curitiba. O nome da câmara faz referência à NBR 15.220/2003: Desempenho térmico das edificações, que define o Zoneamento Bioclimático Brasileiro e estratégias construtivas para otimizar o desempenho de edificações. Nesse sentido, o projeto da CBBC buscou atender as orientações da referida norma para a Zona Bioclimática 1 (ZB1) à qual pertence a cidade de Curitiba (TREVISAN, 2019).

Este ambiente foi denominado como sendo de baixo custo devido aos poucos recursos financeiros aplicados em sua construção se comparados aos grandes investimentos feitos em câmaras construídas em países desenvolvidos (TREVISAN, 2019).

Os dois módulos independentes da CBBC (Figura 9), denominados Módulo Controle (MC) e Módulo Experimental (ME), viabilizam pesquisas comparativas e ensaios simultâneos sob uma mesma condição climática. Os módulos são externos, expostos às variações climáticas, e estão instalados sobre um eixo rotacionável, possibilitando estudos envolvendo orientação solar (TREVISAN 2019).

Figura 9 – Câmara Bioclimática de Baixo Custo (CBBC)



Fonte: Autoria própria

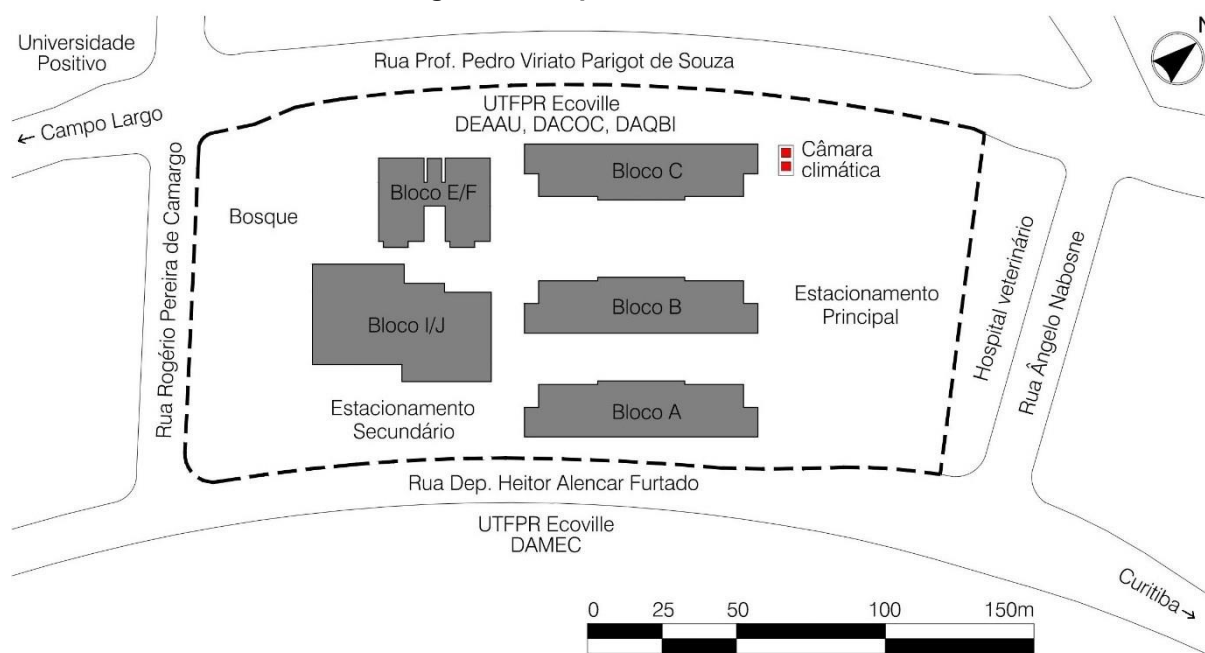
Seguindo os exemplos internacionais, a CBBC foi concebida para ser utilizada como um laboratório, visando ao desenvolvimento de estudos em conforto ambiental na cidade de Curitiba, Paraná, pertencente à Zona Bioclimática 1 (ZB1) na classificação dada pela NBR 15220 (ABNT, 2005).

A aplicabilidade da CBBC é bastante vasta devido ao caráter interdisciplinar do conforto ambiental. No ambiente da UTFPR, diversos alunos e professores podem se beneficiar das instalações da Câmara, como por exemplo os integrantes dos cursos de Arquitetura e Urbanismo, Engenharias Civil, Mecânica Elétrica e Ambiental. Estudos desenvolvidos na CBBC podem, ainda, envolver campos de estudo além das ciências exatas, como por exemplo pesquisas nas áreas de psicologia e medicina (TREVISAN *et al.*, 2017)

Instalada em um dos estacionamentos do *campus* Curitiba, sede Ecoville, da UTFPR (TREVISAN, 2019) a CBBC tem os seguintes confrontantes:

- Noroeste: Rua Prof. Pedro Viriato Parigot de Souza – Via Rápida sentido centro-bairro;
- Sudoeste: Bloco C da UTFPR – Edifício em alvenaria com altura aproximada de 24m;
- Sudeste: Estacionamento da UTFPR – área sem pavimentação, com piso em terra batida;
- Nordeste: Estacionamento da UTFPR – área sem pavimentação, com piso em terra batida.

Figura 10 - Implantação da CBBC



Fonte: Trevisan (2019)

A localização escolhida para implantação dos módulos buscou maximizar a ventilação natural e a insolação. Porém, a CBBC não deixa de receber sombreamento em determinadas horas do dia e em determinados períodos do ano (TAMURA, 2017).

Estudo desenvolvido por Tamura (2017) mostra que a configuração física da CBBC permite um aproveitamento ininterrupto da luz solar por pelo menos quatro horas diárias. No verão a incidência de luz solar acontece entre as 10h00 e as 14h00 e durante o inverno entre 8h00 e 12h00. O resultado do estudo é exibido na Figura 11.

No solstício de verão, o ME projeta sombra no MC do nascer do sol até as 10h00. No período da tarde, o Bloco C projeta sombra em ME a partir das 15h00 (TAMURA, 2017).

Já no solstício de inverno, MC projeta sombra em ME a partir das 13h00. Além disso, a Noroeste, além da Rua Prof. Pedro Viriato Parigot de Souza, existem diversas árvores altas que sombreiam os dois módulos da CBBC durante a tarde. Porém, este fato pode ser amenizado pois tais árvores são de espécie caducifólia, perdendo suas folhas durante o inverno (TAMURA, 2017).

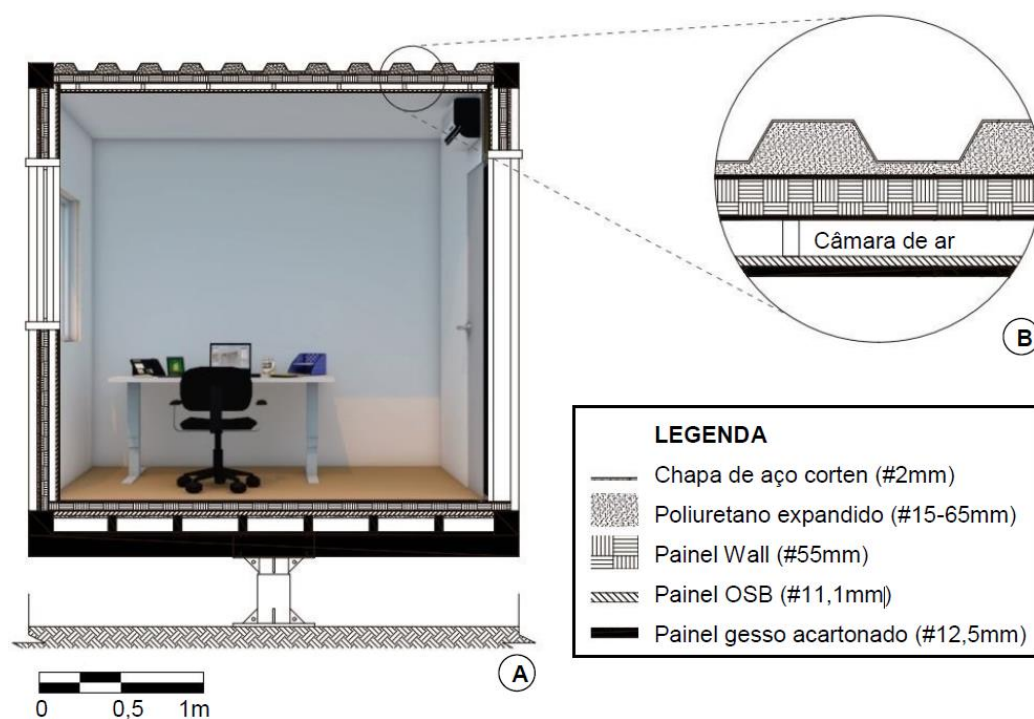
Figura 11 - Simulação da insolação em MC e ME nos solstícios de verão e inverno

	Solstício de verão (22 de dezembro)	Solstício de inverno (22 de junho)
8h00		
9h00		
10h00		
11h00		
12h00		
13h00		
14h00		
15h00		
16h00		
17h00		

Fonte: adaptado de Tamura (2017)

Os módulos são idênticos, possuem área de 5,4m² (C=2,62m, L=2,06m, H=2,50m) e foram construídos utilizando como base um *container*. As paredes e o teto são compostos por chapa de aço corten (2mm) pintada de branco na parte mais externa, seguida por poliuretano expandido (15mm), painel *wall* (55mm), painel OSB (11,1mm) e acabamento interno com painel de gesso acartonado (12,5mm) com pintura branca. O piso é composto por poliuretano expandido (15mm), piso de madeira naval (28mm), painel *wall* (55mm) e acabamento interno em piso vinílico (3mm) (TREVISAN, 2019). Essas camadas podem ser visualizadas na Figura 12.

Figura 12 - Envoltória da CBBC: (A) corte; (B) detalhe



Fonte: Trevisan (2019)

Cada módulo possui duas aberturas: uma porta dupla com área de 1,68m² (porta de madeira e uma porta de aço composta por uma chapa de aço corten de 2mm de espessura e uma camada de poliuretano expandido de 15mm de espessura) e uma janela sem caixilhos (1,40 × 0,90m), composta por duas folhas de vidro temperado 6mm. Uma das folhas é fixa e a outra é de correr (TREVISAN, 2019).

A área de abertura para ventilação (0,63m²), portanto, restringe-se à metade da área total da janela (1,26m²), porém, mesmo assim, atende à NBR15575/2013

que estabelece que a área mínima de abertura para ventilação em ambientes de longa permanência de habitações na ZB1 seja de no mínimo 7% da área do piso (ABNT, 2013).

O sistema de iluminação consiste em três lâmpadas *light emitting diode* – LED com temperatura de cor personalizável e o layout interno da CBBC é similar ao de um escritório, com uma mesa, uma cadeira e um computador (TREVISAN, 2019).

Cada módulo é equipado com um aparelho de ar condicionado do tipo *Split* quente e frio, com configurações de temperatura entre 16°C e 31°C. O equipamento de 9.000 BTU/h tem vazão de ar de 500m³/h, é classificado como “Classe A” de acordo com o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – Procel e possui potência sonora de 37dB(A) para a unidade interna e 50dB(A) para a unidade externa. São cinco os modos de operação do aparelho, conforme descrito abaixo (PHILCO ELETRÔNICOS S.A., 2017):

- *Heat*: Aquece o ambiente;
- *Cool*: Refrigera o ambiente;
- *Dry*: Utilizado em ambientes quentes e úmidos, o aparelho opera no modo refrigeração com a função de desumidificar o ambiente;
- *Fan*: Permite operar apenas como ventilador;
- *Feel*: Identifica a condição do ambiente e escolhe automaticamente o melhor modo de operação.

Estudos de adequação térmica desenvolvidos por Trevisan (2019), mostram que MC e ME têm comportamentos similares e os aparelhos de ar condicionado operam da mesma forma nos dois módulos. Porém as janelas são o maior ponto de fragilidade do sistema de envoltória, permitindo grande troca de calor com o meio externo devido à falta de vedação.

Os ensaios desenvolvidos por meio de fotografias termográficas mostram que o fechamento da janela é frágil e configura uma ponte térmica (TREVISAN, 2019). Para chegar a essa conclusão, Trevisan (2019) levou em consideração os parâmetros mínimos de transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico estipulados para a região de Curitiba pela NBR 15220/2005. Como a norma não estabelece valores para superfícies envidraçadas, a autora considerou como referência os parâmetros equivalentes à parede, conforme ilustrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Caracterização da janela da CBBC segundo a NBR 15220/2005

Vedação	Composição	U [W/(m ² .K)]		CT [kJ/(m ² .K)]		φ [h]	
		Máx.	Obtido	Mín.	Obtido	Mín.	Obtido
Janela	Vidro temperado 6mm	2,5	6	130	12,6	4,3	0,1

Fonte: Adaptado de Trevisan (2019)

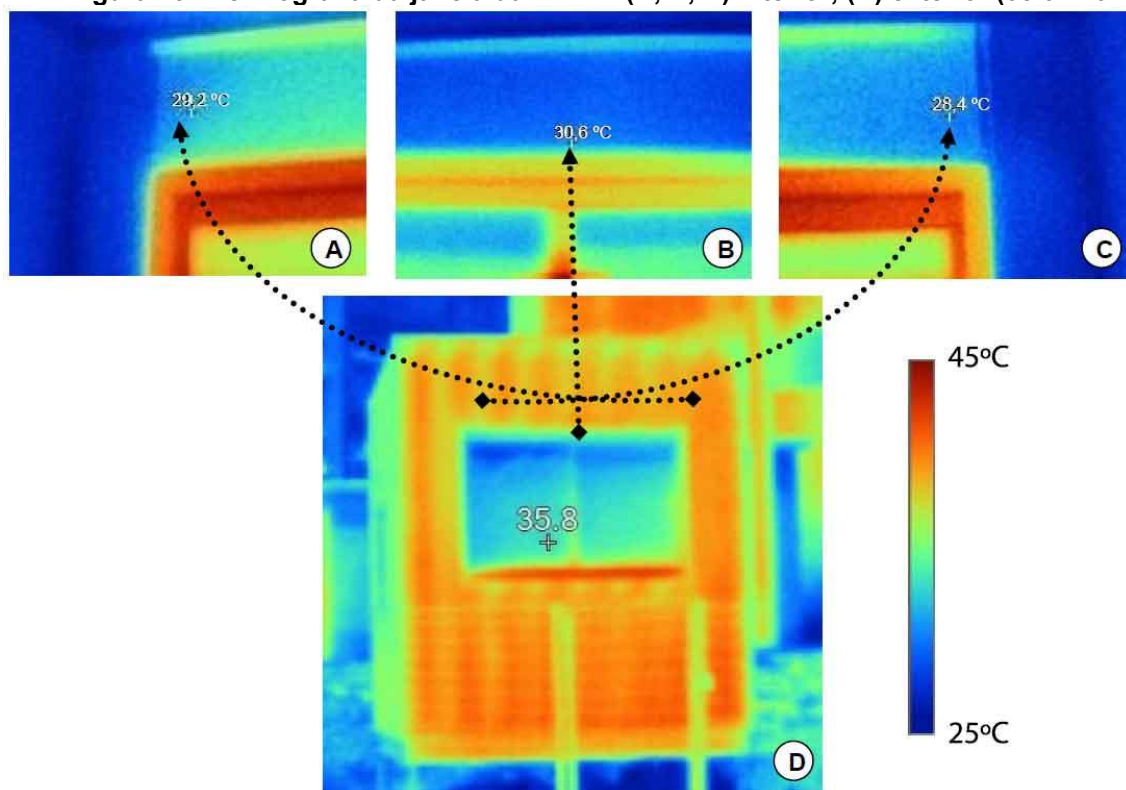
A termografia utiliza a energia infravermelha emitida pelos objetos convertendo-a em uma imagem visível, representando os níveis de energia em escala de cores (RAO, 2008). A escala cromática, em uma fotografia termográfica, segue a representação do espectro visível, variando entre o violeta (radiação mínima) e o vermelho (radiação máxima). Porém, como a escala é recalibrada a cada registro, cores iguais podem referir-se a temperaturas diferentes. Na CBBC, as vedações foram avaliadas com essa técnica visando identificar possíveis pontes térmicas – superfícies com perda ou ganho de calor decorrente do desencontro de homogeneidade de materiais.

Para fazer as avaliações termográficas, em 05 de abril de 2018, entre 14h50 e 15h30, foi utilizada uma câmera termográfica marca Fluke, modelo Ti9, com faixa de medição de -20°C a 250°C, precisão de ±5°C, sensibilidade de 0,2°C a 30°C e resolução de 640 × 480 pixels (FLUKE, 2019). As imagens foram processadas no software *ThermaCAM Researcher* (TREVISAN, 2019).

Na Figura 13 D, que mostra o exterior da CBBC, fica claro o acúmulo de radiação infravermelha na superfície metálica da Câmara. Já as Figura 13 A, B e C focam o perímetro da janela no interior do ambiente, e evidenciam a fragilidade de suas vedações pois mostram que a emissão de calor é maior no encontro entre a janela e a parede. Percebe-se nessas imagens que a transmissão de calor pelo contramarco metálico da janela ocorre por condução, enquanto os vidros (6mm) apresentam baixa condutância (TREVISAN, 2019).

Trevisan (2019) ressalta em seu trabalho que a vedação da porta é visivelmente melhor do que a da esquadria, uma vez que a Câmara conta não só com uma porta de madeira, como também uma segunda porta, sobreposta à primeira, composta por chapa de aço corten (2mm) e poliuretano expandido (15mm). A autora conclui que a janela é o principal ponto de fragilidade da CBBC, levando à ocorrência de pontes térmicas nos recortes da envoltória.

Figura 13 - Termografia da janela da CBBC: (A, B, C) Interior; (D) exterior (05/04/2018)

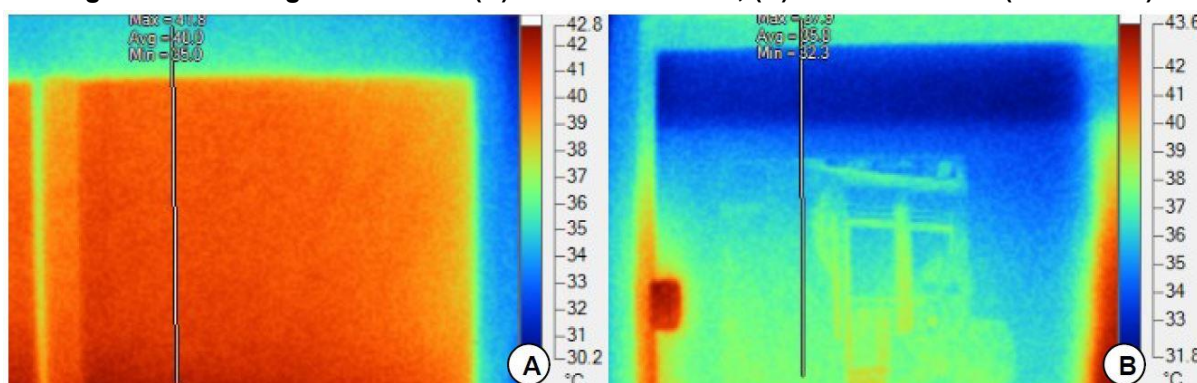


Fonte: Trevisan (2019)

Foi desenvolvido também um ensaio termográfico para entender o comportamento da persiana na condução de calor. A Figura 14 A mostra que, embora a persiana bloqueie a luz, o material se aquece e supera a temperatura superficial obtida com a cortina aberta. Observa-se ainda que, através da cortina, existe uma faixa com temperatura superficial mais baixa no encontro das lâminas de vidro. Isso provavelmente acontece em virtude de frestas que permitem entrada de ar. O isolamento térmico nesse ponto é praticamente nulo, podendo ser considerado uma ponte térmica.

Quando a persiana é aberta, conforme ilustrado na Figura 14 B, a diferença de temperatura superficial entre o contramarco metálico e vidro chega a 11,8°C, conforme indicado na escala da imagem termográfica.

Figura 14 - Termografia interior: (A) Persiana fechada; (B) Persiana aberta (05/04/2018)



Fonte: Trevisan (2019)

Trevisan (2019) verificou, ainda, a adequação da CBBC quanto às normas vigentes de acústica, em especial a NBR 15575/2013 que normatiza o desempenho de edificações habitacionais no Brasil. Nesse quesito, o nível de isolamento acústico da CBBC foi considerado insuficiente, sendo a janela o principal ponto de fragilidade da envoltória.

A diferença de nível padronizada encontrada na CBBC foi de 17dB(A), inferior ao mínimo recomendado de 25 dB(A) para envoltória de dormitórios, segundo a NBR 15575/2013. Embora não exista regulamentação nacional para diferença de nível padronizada para outras tipologias, o isolamento acústico foi considerado insuficiente, sendo a janela o principal ponto de fragilidade da envoltória (TREVISAN, 2019).

Com o exposto, entende-se que a CBBC tem um caráter multidisciplinar e é capaz de fomentar e viabilizar a realização de diversas pesquisas científicas e abrigar aulas laboratoriais conciliando diversas áreas do conhecimento. Porém, percebe-se que os módulos necessitam de melhorias, principalmente na eficiência termoacústica da envoltória. Tais aperfeiçoamentos permitirão uma melhor utilização da Câmara, proporcionando resultados mais confiáveis em estudos futuros.

3.2 INSTALAÇÃO DE JANELA DUPLICADA EM ME

Cada módulo da CBBC possuía originalmente uma janela de 140cm × 90cm (largura × altura) com duas folhas, uma fixa e uma de correr, sem esquadrias, com vidro temperado incolor 6mm. Como visto nos capítulos anteriores, tal elemento é um ponto de fragilidade para o desempenho termoacústico da Câmara.

O vidro temperado é aquele que passou por um tratamento térmico para aumentar sua resistência contra tensões mecânicas (flexão e choques) ou térmicas (diferença de temperatura). A resistência a choques de vidros temperados é cerca de seis vezes maior do que a de vidros comuns (SCHERER, 2005).

Existem no mercado diversas soluções de janelas de alto desempenho, que incluem vidros de baixa emissividade, folhas insuladas e perfis com alta capacidade de vedação. Porém, esses produtos têm alto preço e não seriam compatíveis com o orçamento disponível para melhoria da CBBC, tampouco com o conceito de baixo custo empregado na Câmara.

A fim de estudar uma viabilidade de baixo custo para melhorar o desempenho termoacústico da CBBC, surgiu a hipótese de que a instalação de uma janela simples em sobreposição à existente poderia solucionar os problemas de vedação da envoltória.

Por questões técnicas, janelas de vidro temperado, como as existentes na CBBC, devem ter pelo menos uma folha fixa. Assim, a instalação de outra janela similar sobreposta à existente resultaria dificuldade de limpeza em uma das folhas, visto que a distância entre as folhas fixas seria muito pequena para os procedimentos de enxague dos vidros.

A partir daí, buscou-se no mercado outro produto economicamente viável e tecnicamente suficiente para melhorar a abertura dos módulos. A solução foi uma janela de 140cm × 90cm (largura × altura) com duas folhas tipo máximo ar, esquadria em alumínio branco, montantes preenchidos com isopor e vidro laminado incolor (vidro 4mm + PVB incolor + vidro 4mm). A solução pode ser vista na Figura 15.

As esquadrias do tipo máximo ar têm maior facilidade mecânica de vedação do que as de correr, visto que seu fechamento se dá por pressão de toda a folha contra o marco da esquadria (GUSTAVSEN *et al.*, 2007).

O vidro laminado consiste em duas ou mais chapas de vidro monolítico com uma ou mais películas de PVB (polivinilbutiral) aplicada entre elas. O PVB é uma película plástica e elástica disponível em várias cores que, em caso de quebra do vidro, prende os cacos, reduzindo, assim, o risco de ferimentos.

Além da maior segurança contra estilhaços, os vidros laminados apresentam um ganho de isolamento acústico de cerca de 2dB(A) em relação aos vidros comuns e temperados de igual espessura (SCHERER, 2005)

Espera-se que a instalação de uma janela sobreposta à janela de vidro temperado diminua os ganhos de calor em dias quentes e seja responsável por temperaturas mais altas no interior da CBBC em dias frios.

Como observado por Trevisan (2019), a janela de vidro temperado existente possui vedação deficiente do ponto de vista termoacústico, o que pode ser compensado pela vedação da nova janela tipo máximo ar.

Além disso, o vidro temperado possui alta transmitância térmica (U) e alto fator solar (FS), indicando maiores trocas térmicas com o meio externo, enquanto o vidro laminado utilizado na nova janela possui maiores índices de eficiência, conforme descrito na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores de U e FS para vidro temperado 6mm e vidro laminado 8mm

	U (W/m ²)	FS
Vidro temperado incolor 6mm	8,35	0,90
Vidro laminado incolor 4+4mm	5,70	0,57

Fonte: Adaptado de Westphal, 2016

Como parte desta pesquisa, a instalação da nova esquadria em ME foi feita em 23 de novembro de 2018 por empresa especializada do ramo de janelas de alumínio por meio de recursos remanescentes do Edital Universal MCTI/CNPq nº 01/2016 e teve um custo unitário de R\$715,00, incluindo material e mão de obra para instalação. Os custos de todo o sistema são indicados na Tabela 6.

Em um primeiro momento, a esquadria duplicada não foi instalada em MC para que pudessem ser feitos estudos comparativos a fim de verificar a real eficiência desta solução de baixo custo no desempenho termoacústico da CBBC.

Tabela 6 - Custos de fornecimento e instalação das janelas de MC e ME

	Janela de correr + vidro temperado incolor 6mm	Janela máximo ar + montantes preenchidos com isopor + Vidro laminado 4+4	TOTAL
MC	R\$550,00	-	R\$550,00
ME	R\$550,00	R\$715,00	R\$1.265,00

Fonte: Autoria própria

Figura 15 - Janela duplicada em ME: (A) vista externa; (B) vista interna



Fonte: Autoria própria

3.3 OBTENÇÃO DE DADOS DE TEMPERATURA EM PERÍODO QUENTE

Nesta etapa MC e ME foram expostos a diferentes situações em dias quentes durante o verão e o início do outono para que fossem monitoradas diversas variáveis internas e externas, como temperatura, umidade do ar e velocidade do vento. Com isso, buscou-se evidenciar as disparidades de desempenho entre diferentes sistemas de esquadrias.

Os procedimentos utilizados nos experimentos baseiam-se em pesquisas realizadas anteriormente, quando buscava-se verificar a adequação térmica dos módulos da CBBC (TREVISAN, 2019).

Os equipamentos utilizados foram calibrados previamente em laboratório acreditado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO, o ambiente ficou desocupado durante os experimentos, e não houve interrupção do processo em nenhum momento.

3.3.1 Monitoramento em Dias Quentes sem Ar Condicionado

A primeira etapa de monitoramento ocorreu no verão de 2019, entre as 18h00 do dia 9 de março e as 18h00 do dia 15 de março. Ambos os módulos estavam com as aberturas orientadas para o Norte, as janelas permaneceram fechadas e as persianas estavam abertas.

Sobre MC foi instalada, permanentemente, uma estação meteorológica composta por 1 anemômetro capaz de medir velocidade e direção de ventos (Onset S-WCA-M003, precisão de $\pm 0,5\text{m/s}$) e um termo-higrômetro (Onset – HOBO S-THB-M002, precisão de $0,2^\circ\text{C}$ para temperatura e $\pm 2,5\%$ para umidade), conforme ilustrado na Figura 16. Mais tarde, dois piranômetros (Onset – HOBO S-LIB-M003, precisão de $\pm 10\text{ W/m}^2$) foram acoplados, sendo um em plano horizontal – a fim de medir a irradiação global – e outro em plano vertical orientado para o Norte verdadeiro.

Figura 16 - Estação meteorológica sobre MC



Fonte: Autoria própria

Os equipamentos foram acomodados a 5,00m do solo, em um tripé metálico fixado por tirantes de aço sobre MC. O termo-higrômetro foi posicionado dentro de um abrigo e os dispositivos foram conectados a um *data logger* para estações meteorológicas (Onset – HOBO *Weather Station Data Logger* H21-001). O anemômetro e o *data logger* foram devidamente aterrados.

No nível do solo, entre os dois módulos, foi colocado outro tripé metálico com um termo-higrômetro (Onset – HOBO S-THB-M002, precisão de 0,2°C para temperatura e $\pm 2,5\%$ para umidade) abrigado a 2,00m de altura e conectado a *data logger* para estações meteorológicas (Onset – HOBO *Weather Station Data Logger* H21-001). Este sensor serviu como backup para os dados coletados na estação meteorológica sobre MC.

Todos os equipamentos externos foram configurados para obter dados a cada 15 minutos.

Dentro de cada um dos módulos, a temperatura foi monitorada por sensores da marca Novus, modelo TagTemp Stick (precisão de ± 1 °C). Foram instalados 5 sensores em um suporte de sensores concebido por Kaviski (2018), posicionado no centro do ambiente, conforme Figura 17.

Figura 17 - Suporte de sensores

Fonte: Autoria própria

Quatro sensores, responsáveis por monitorar a temperatura ambiente, foram protegidos por meia-cana de PVC revestida internamente com papel alumínio para evitar o efeito da incidência solar direta nos sensores. Os equipamentos foram posicionados a 0,10m, 0,60m, 1,10m e 1,70m, conforme preconizado pela norma ISO 7726/1998 para medições de temperatura ambiente com o ocupante sentado ou em pé. A Figura 18 ilustra as alturas recomendadas pela referida norma para obtenção de dados de temperatura em ambientes internos.

Figura 18 – Altura recomendada para obtenção de dados de temperatura em ambientes internos

Altura dos sensores	Pessoa sentado (m)	Pessoa em pé (m)
Nível da cabeça	1,10	1,70
Nível do abdômen	0,60	1,10
Nível do tornozelo	0,10	0,10

Fonte: Adaptado de ISSO (1998)

O quinto sensor foi posicionado a 1,10m de altura no interior de uma esfera plástica pintada de cinza, para minimizar os efeitos da radiação solar direta (THORSSON *et al.*, 2007; NIKOLOPOULOU *et al.*, 1999), conforme mostra a Figura 19, configurando um termômetro de globo.

Figura 19 - TagTemp Stick a 1,10m de altura e termômetro de globo presos ao suporte de sensores



Fonte: Autoria própria

Os dados colhidos pelo termômetro de globo foram utilizados para a obtenção da temperatura radiante média. A norma ISO 7726 (1998) define temperatura radiante média como sendo “a temperatura uniforme de um ambiente imaginário no qual a troca de calor por radiação com o corpo humano é igual à troca de calor por radiação no ambiente real não uniforme” e estabelece procedimentos para obtenção desta grandeza utilizando termômetro de globo. Neste método, a temperatura radiante média é obtida a partir da seguinte equação:

$$T_{rm} = \left[(T_g + 273,15)^4 + \frac{1,1 \times 10^8 \cdot V_a^{0,6}}{\varepsilon \cdot D^{0,4}} \times (T_g - T_a) \right]^{1/4} - 273,15$$

Onde:

T_{rm} temperatura radiante média (°C)

T_g temperatura de globo (°C)

T_a temperatura do ar (°C)

V_a velocidade do ar (m/s)

ε emissividade do globo

D diâmetro do globo

Internamente, também foram monitoradas as temperaturas superficiais do piso, teto e parede Oeste de MC e ME. Para tanto, foram instalados sensores da marca Novus, modelo TagTemp-NFC (piso e teto), com precisão de ± 1 °C, conforme pode ser visto na Figura 17, e sensores HOB0 Pro V2 U23-004 (parede), com precisão de $\pm 0,2$ °C. Os sensores foram protegidos por placa de isopor para minimizar a interferência da temperatura ambiente na obtenção de dados.

A temperatura superficial da parede Oeste foi medida no meio do seu comprimento e a 1,10m de altura. A luminária instalada no centro de cada módulo da CBBC obrigou a instalação do sensor superior ligeiramente a Oeste. Visto que no ponto médio do piso de MC e ME foi posicionado o suporte para sensores, e o sensor de piso também não pode ser centralizado, ficando alinhado ao sensor de teto.

Todos os equipamentos internos foram configurados para registrar os dados a cada 5 minutos.

Essa primeira etapa de monitoramento teve como objetivo comparar os dados de temperatura interna de MC e ME e, assim, estabelecer uma relação entre a eficiência térmica da janela de vidro temperado (MC) e a janela duplicada (ME) em dias quentes.

3.3.2 Monitoramento em Dias Quentes com Ar Condicionado

A segunda etapa de monitoramento ocorreu no outono de 2019, no dia 06 de maio. Ambos os módulos estavam com as aberturas orientadas para o Norte, as janelas permaneceram fechadas e as persianas estavam abertas. Nesta fase, buscou-se avaliar a influência da janela sobre a eficiência do aparelho de ar condicionado.

De forma análoga à primeira etapa, foram coletados dados climáticos do ambiente externo por meio da estação meteorológica instalada sobre MC. Para coleta dos dados de temperatura interna, também foram repetidas as configurações do monitoramento anterior, ilustrados na Figura 17 e na Figura 19, respeitando as premissas da norma ISO 7726/1998 para medições de temperatura ambiente com o ocupante sentado ou em pé.

A coleta de dados teve duração de 13h00, com início às 8h15 e encerramento às 21h15, sendo que o ar condicionado permaneceu ligado em 20°C (*setpoint*) no modo *cool* por 9h00, entre às 9h15 e às 18h15. O período de monitoramento posterior ao desligamento do ar condicionado buscou verificar o tempo necessário para a temperatura interna dos dois módulos se igualar a temperatura externa.

O consumo energético do aparelho de ar condicionado também foi medido, com o uso de um medidor eletrônico multifunção integrado, modelo B1C3 da Landis+Gyr, aparelho com classe de exatidão B pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, ligado ao disjuntor exclusivo do ar condicionado. Os dados de consumo foram monitorados de 5 em 5 minutos e foram avaliados com a utilização do *software* Meter.Comm, desenvolvido pela própria fabricante do equipamento.

3.4 OBTENÇÃO DE DADOS DE TEMPERATURA EM PERÍODO FRIO

Nesta etapa, MC e ME foram expostos a diferentes situações em dias frios durante o inverno para que fossem monitoradas diversas variáveis. Com isso, buscou-se evidenciar as disparidades de desempenho entre diferentes sistemas de esquadrias na manutenção da temperatura interna na CBBC.

Os procedimentos utilizados nos experimentos baseiam-se na norma ISO 7726/1998, nos ensaios já realizados em dias quentes e em pesquisa realizada anteriormente (TREVISAN, 2019).

3.4.1 Monitoramento em Dias Frios sem Ar Condicionado

O monitoramento de variáveis em dias frios sem a influência de ar condicionado aconteceu entre os dias 04 de julho e 13 de agosto de 2019. Nesse período foi registrada a temperatura mais fria do ano pela estação meteorológica instalada sobre MC: 1,0°C, às 7h00 do dia 06 de julho.

Assim como nos ensaios anteriores, além dos dados climáticos externos, foram distribuídos 5 sensores da marca Novus, modelo TagTemp Stick em um suporte concebido por Kaviski (2018), posicionado no centro do ambiente, conforme Figura 17.

Os equipamentos foram dispostos a 0,10m, 0,60m, 1,10m e 1,70m, conforme preconizado pela norma ISO 7726/1998 para medições de temperatura ambiente com o ocupante sentado ou em pé e um dos sensores foi instalado dentro de uma esfera plástica pintada de cinza, para minimizar os efeitos da radiação solar direta (THORSSON *et al.*, 2007; NIKOLOPOULOU *et al.*, 1999), a 1,10m de altura.

Ambos os módulos estavam com as aberturas orientadas para o Norte, as janelas permaneceram fechadas e as persianas estavam abertas.

3.4.2 Monitoramento em Dias Frios com Ar Condicionado

Para avaliar a influência da janela sobre a manutenção da temperatura interna utilizando o ar condicionado, foram instalados em cada módulo um sensor na saída da evaporadora, além dos 5 sensores TagTemp Stick no suporte concebido por Kaviski (2018).

O experimento foi conduzido entre os dias 02 e 04 de julho de 2019 com o ar condicionado configurado a 23°C (*setpoint*). Nessa ocasião, foi utilizado o modo *feel* do aparelho, que identifica a condição do ambiente e escolhe automaticamente o melhor modo de operação.

Assim como nos ensaios anteriores, além dos dados climáticos externos, 5 sensores da marca Novus, modelo TagTemp Stick foram dispostos a 0,10m, 0,60m, 1,10m e 1,70m – conforme preconizado pela norma ISO 7726/1998 – em um suporte concebido por Kaviski (2018), posicionado no centro do ambiente, conforme Figura 17.

Nesta etapa de monitoramento, um outro sensor Novus, modelo TagTemp Stick, foi instalado na aleta da evaporadora do ar condicionado (Figura 20) para medir a temperatura que o ar estava sendo insuflado no ambiente, pois, como o modo *feel* escolhe automaticamente o modo de operação do aparelho, a temperatura do ar insuflado não é constante.

Figura 20 – Sensor de temperatura instalado na aleta da evaporadora



Fonte: Autoria própria

Durante o período, o condicionamento artificial de temperatura foi ininterrupto. Ambos os módulos estavam com as aberturas orientadas para o Norte, as janelas permaneceram fechadas e as persianas estavam abertas.

3.5 OBTENÇÃO DE DADOS DE ILUMINAÇÃO NATURAL

A iluminância dos dois módulos da CBBC foi monitorada durante os dias 29 de fevereiro e 1 de março de 2020, 9 dias após o equinócio de outono. Durante o experimento MC e ME foram orientados com a janela voltada para o Norte verdadeiro, as persianas permaneceram abertas e as janelas fechadas.

As medições foram feitas simultaneamente nos dois módulos com a utilização de luxímetro modelo Flex X-08 da marca Criffer, com faixa de medição para luminosidade entre 0,01 lux e 100.000 lux e espectro de 380 nm a 780 nm, calibrados pela fábrica e conectados a data logger da mesma marca.

Os medidores foram dispostos sobre as mesas de cada um dos módulos, distantes 1 metro da janela e configurados para gravar os dados de luminosidade a cada 5 minutos. Os vidros das janelas de MC e ME foram limpos para evitar a influência de sujeira na transmissão luminosa.

Para avaliar os efeitos da incidência da luz natural no conforto lumínico da CBBC, os dados coletados foram avaliados sob os parâmetros estabelecidos na NBR ISO/CIE 8995, que trata da iluminação em ambientes de trabalho (ABNT, 2013) e na Norma de Higiene Ocupacional (NHO) 11, que dispõe sobre os níveis de iluminamento em ambientes internos de trabalho (FUNDACENTRO, 2018).

Nas duas normas a iluminância mínima sobre o plano de trabalho em ambientes de escritório é de 500 lux (ABNT, 2013), com uma tolerância de 10% para cima ou para baixo (FUNDACENTRO, 2018).

Para determinar o valor máximo de iluminância foi usado o critério de *Useful Daylight Illuminance* (UDI) desenvolvido por Nabil e Mardaljevic (2015) que estabelece que valores maiores do que 2.000 lux sobre o plano de trabalho podem gerar ofuscamento e diminuir o conforto do usuário.

3.6 OBTENÇÃO DE DADOS DE CONCENTRAÇÃO DE CO₂

Nesta etapa buscou-se verificar se a estanqueidade do sistema duplo de janelas instalado em ME é maior do que a da janela de vidro temperado em MC. O procedimento compreende o monitoramento da concentração de dióxido de carbono

(CO₂) no interior dos dois módulos e sua utilização como gás traçador para obtenção da taxa de renovação de ar nos dois ambientes.

A concentração desse gás é um importante indicador do nível de poluição produzido pelas pessoas em ambientes internos, uma vez que o metabolismo humano consome oxigênio (O₂) e produz CO₂ e vapor d'água, eliminados na respiração com demais efluentes biológicos causadores de odores (ABNT, 2008).

A NBR 16401/2008 adverte que a concentração de CO₂ não pode ser considerada um indicador absoluto da qualidade do ar interno, visto que muitos poluentes químicos, além dos produzidos pelas pessoas, podem afetar o bem-estar do usuário. Muitos estudos, entretanto, utilizam o CO₂ como gás traçador na obtenção da taxa de renovação de ar em ambientes internos (SANTOS, 2008; PINTO *et al.*, 2012; LANZINHA *et al.*, 2015).

Foram feitas duas etapas de monitoramento – a primeira nos dias 14 e 15 de fevereiro de 2020 e a segunda nos dias 10 e 11 de março do mesmo ano – com a participação de 4 voluntários.

Nas duas etapas foram utilizados medidores de CO₂ modelo Flex X-06 da marca Criffer, com faixa de medição para concentração de 0 a 40.000 ppm, calibrados pela fábrica e conectados a data logger da mesma marca. Os dois módulos da CBBC foram orientados com a janela voltada para o Norte verdadeiro, as persianas permaneceram abertas e as janelas fechadas.

Em cada uma das etapas as medições em MC e ME foram feitas simultaneamente com um voluntário no interior de cada módulo, sentado, para produção de CO₂ através da respiração. Os participantes foram orientados a não respirar diretamente sobre os medidores para não comprometer a obtenção dos dados. Os medidores foram dispostos sobre as mesas de cada um dos módulos, distantes 1 metro da janela e configurados para gravar os dados de concentração de CO₂ a cada 5 minutos.

Os participantes permaneceram nos ambientes até ser registrada concentração de pelo menos 2.000 ppm nos dois módulos. Após a saída simultânea dos voluntários, os dados continuaram a ser registrados até a concentração do gás atingir 300 ppm, momento no qual a concentração de CO₂ no interior dos módulos fica mais suscetível às variações externas.

Para obtenção da taxa de renovação de ar foi utilizado o método do decaimento da concentração de um gás traçador (CO₂), segundo a metodologia

definida na norma ASTM E 741/2006, onde a taxa de renovação pode ser obtida pela fórmula:

$$\bar{A} = [\ln C(t_2) - \ln C(t_1)] / (t_2 - t_1)$$

Onde:

\bar{A} taxa de renovação (h^{-1})
 $C(t_1)$ concentração do gás no instante inicial (ppm)
 $C(t_2)$ concentração do gás no instante final (ppm)
 t tempo (h)

Para apuração do decaimento da concentração de CO₂ o momento em que os voluntários saíram simultaneamente dos módulos foi considerado o momento inicial de análise dos dados.

Uma vez que para a saída dos participantes a concentração mínima de 2.000 ppm deve ser obedecida nos dois módulos, supõe-se que a concentração do gás no momento inicial deve ser diferente em MC e ME.

Considerando essa situação, para possibilitar a comparação entre o decaimento de CO₂ dos dois módulos, foi calculada uma concentração normalizada do gás para cada módulo segundo o estabelecido por Roulet e Foradini (2002) que aplica a seguinte equação:

$$C_N = \ln [(C_t - C_{ext}) / (C_i - C_{ext})]$$

Onde:

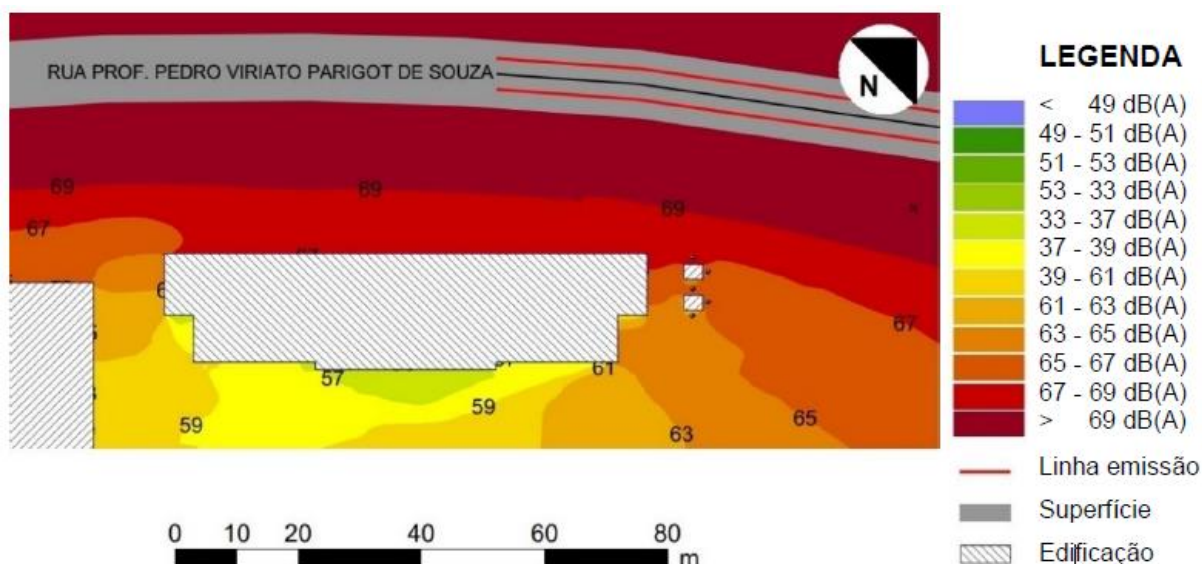
C_N Concentração normalizada (ppm)
 C_t Concentração do gás através do tempo (ppm)
 C_i Concentração do gás no momento inicial (ppm)
 C_{ext} Concentração do gás no ambiente externo (ppm)

3.7 OBTENÇÃO DE DADOS ACÚSTICOS

Um mapa acústico da UTFPR Sede Ecoville (Figura 21) foi previamente desenvolvido por Amarilla *et al.* (2018), considerando a topografia do terreno e a geometria da área de estudo. Para calcular a propagação sonora local, os autores

levantaram uma série de parâmetros, incluindo as características das vias próximas ao *campus* e o fluxo de veículos por hora.

Figura 21 – Mapa de ruído ambiental no entorno na CBBC



Fonte: adaptado de Ribeiro e Amarilla (2018)

O estudo desenvolvido indicou que MC está exposto a maiores ruídos externos devido a sua proximidade à rua Professor Pedro Viriato Parigot de Souza – maior fonte de ruído na região da CBBC – e, ao mesmo tempo, MC projeta um sombreamento acústico em ME. Assim, observa-se que o fluxo de veículos tem grande influência na intensidade do ruído na proximidade da CBBC (AMARILLA *et al.*, 2018).

O fluxo de veículos nas avenidas de Curitiba tem um aumento significativo a partir das 7h00. Entre às 7h00 e às 10h00 observa-se um pico no tráfego de veículos no período matutino. Após, entre às 10h00 e às 17h00, o tráfego se mantém intenso e entre às 17h00 e às 19h00 acontece o pico vespertino. A partir das 19h00 a intensidade do fluxo de veículos diminui rapidamente (SETRAN, 2015).

Em abril de 2018, antes de ser instalada a janela duplicada em ME em novembro do mesmo ano, foram realizadas três medições acústicas de 15 minutos em cada módulo. Essas medições preliminares aconteceram das 9h00 às 12h00, momento de ruído intenso, e tanto MC quanto ME estavam com a face da janela voltada para a Rua Prof. Pedro Viriato Parigot de Souza.

Este experimento foi descrito por Trevisan (2019) e concluiu que os módulos têm comportamento similar entre si, sendo que no interior de MC foram registrados níveis de pressão sonora ligeiramente superiores à ME, indicando a maior influência da via rápida em MC.

Para a presente pesquisa, a fim de comparar o desempenho acústico de MC, com janela simples, e ME, com janela duplicada, foram realizadas quatro medições de 5 minutos no módulo ME no dia 25 de abril de 2019, com a fachada da janela voltada à rua, entre às 16h30 e às 17h00, horário próximo ao pico de tráfego vespertino.

Utilizou-se para as medições um analisador de frequência de classe 1, da marca Bruel & Kjaer, modelo B&K 2250-Light com microfone de ½” tipo campo aberto acoplado. O equipamento tem faixa de medição dinâmica de 120dB(A), faixa de frequência de banda larga de 5Hz a 20kHz e sensibilidade nominal de circuito aberto de 50mV/Pa ± 2dB(A). Foram verificados os níveis de pressão sonora contínua equivalente, ponderados em A (L_{Aeq}), integrados durante 5 minutos de medição em ME.

O nível de pressão sonora contínuo equivalente (L_{eq}) é o nível médio de pressão sonora durante um período de registro e pode ser considerado o descritor de energia sonora mais comum (BISTAFA, 2011; LONG, 2014). O nível de pressão sonora contínuo equivalente é descrito matematicamente como uma integral durante um intervalo de tempo, conforme a seguinte equação:

$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \cdot \int_0^T 10^{L_p(t)/10} dt \right]$$

Onde:

L_{eq} Nível de pressão Sonora contínuo equivalente [dB(A)]

$L_p(t)$ Nível sonoro no instante t [dB(A)]

T Intervalo de tempo de registro [s]

Para determinação do L_{Aeq} representativo de um ambiente, utilizou-se, conforme preconizado pela NBR 10152 (2020b) a média logarítmica dos níveis de pressão sonora contínuos equivalentes, globais, ponderada em A.

Figura 22 - Analisador de frequência



Fonte: Trevisan (2019)

O equipamento dentro de ME foi posicionado no centro do módulo a uma altura de 150cm, conforme Figura 22. Devido à indisponibilidade de equipamentos, inviabilizou-se o monitoramento simultâneo em MC e ME. Assim, assumiram-se dados referenciais da medição acústica realizada em abril de 2018.

4 RESULTADOS

4.1 COMPARAÇÃO DE TEMPERATURAS EM PERÍODO QUENTE

Com o referido experimento, buscou-se comparar o comportamento térmico de MC, com janela simples, e ME, com janela duplicada, a fim de identificar possíveis contribuições do fechamento das aberturas para o desempenho térmico da CBBC.

Simultaneamente à coleta de dados no interior dos módulos, as condições climatológicas externas foram obtidas com a ajuda de uma estação meteorológica instalada sobre MC. As variáveis adquiridas foram temperatura e umidade do ar e também direção e velocidade do vento.

4.1.1 Monitoramento em Dias Quentes sem Ar Condicionado

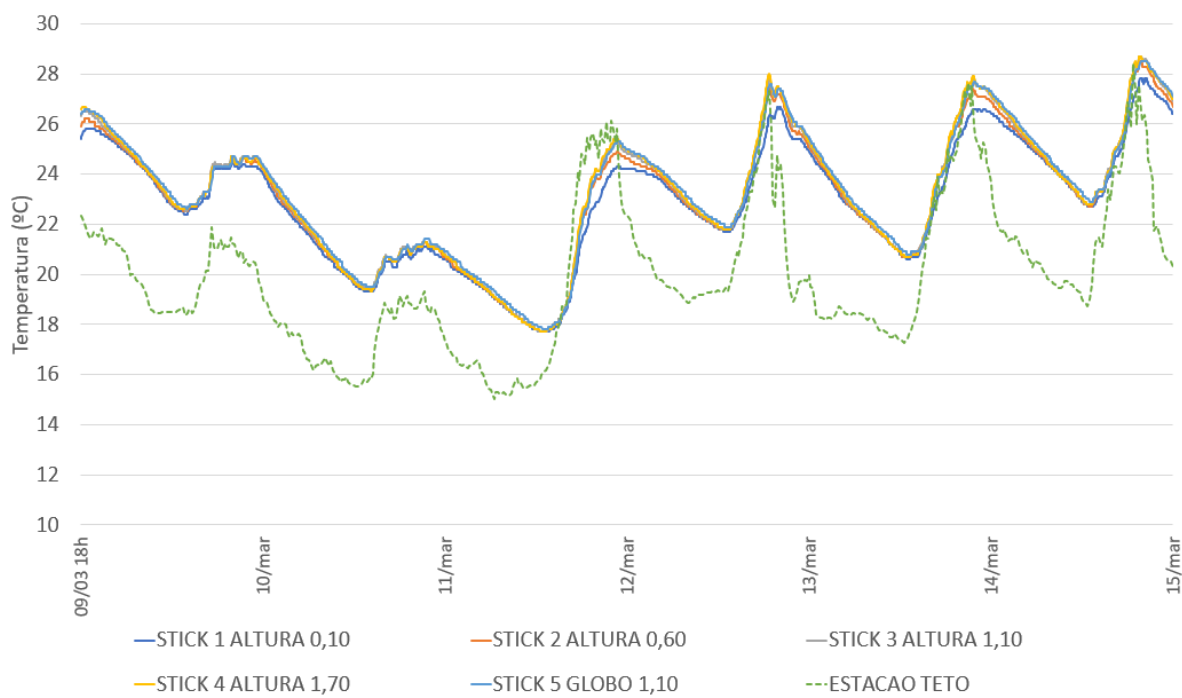
Durante os seis dias de coleta de dados, os dois primeiros dias foram significativamente mais frios, com temperatura máxima de 21,6°C medida às 18h00 do dia 9 de março e mínima de 14,3°C às 00h30 do dia 12 de março de 2019. Os dias subsequentes tiveram aumento gradual de temperatura com a máximas de 27,7°C às 14h45 do dia 15 de março.

A umidade variou entre 57,2%, registrada às 13h00 do dia 15 de março, e 95,3%, registrada às 7h15 do dia 14 de março.

A Figura 23 mostra o comportamento da temperatura no interior de MC, comparando os registros dos 5 sensores instalados na árvore de sensores com a temperatura externa obtida pela estação meteorológica.

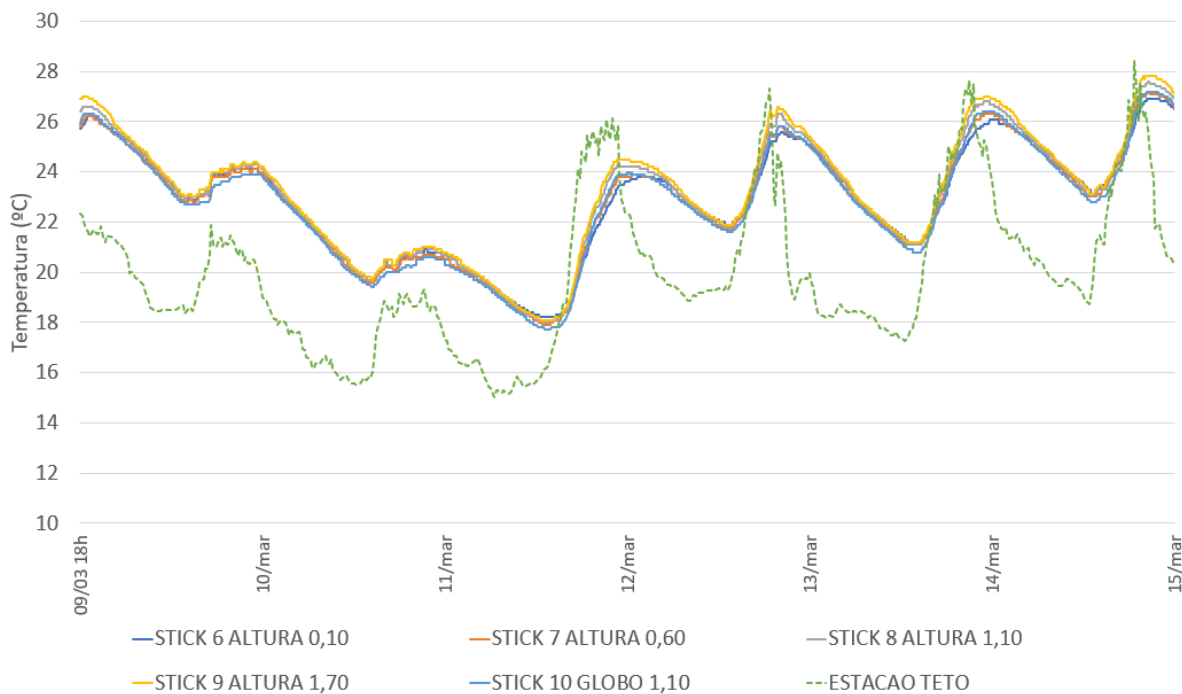
Da mesma forma a Figura 24 mostra o comportamento da temperatura no interior de ME e a variação da temperatura externa. Comparando os dois gráficos, nota-se que nos dias mais quentes, as temperaturas máximas no interior de ME não atingiram as temperaturas máximas diárias, enquanto em MC as temperaturas chegaram a superar as temperaturas mais altas. Isso mostra que o sistema de janela duplicada tem um desempenho melhor do que a janela simples no que concerne aos ganhos solares demasiados em dias quentes.

Figura 23 - Temperaturas no interior de MC entre 09 de março e 15 de março



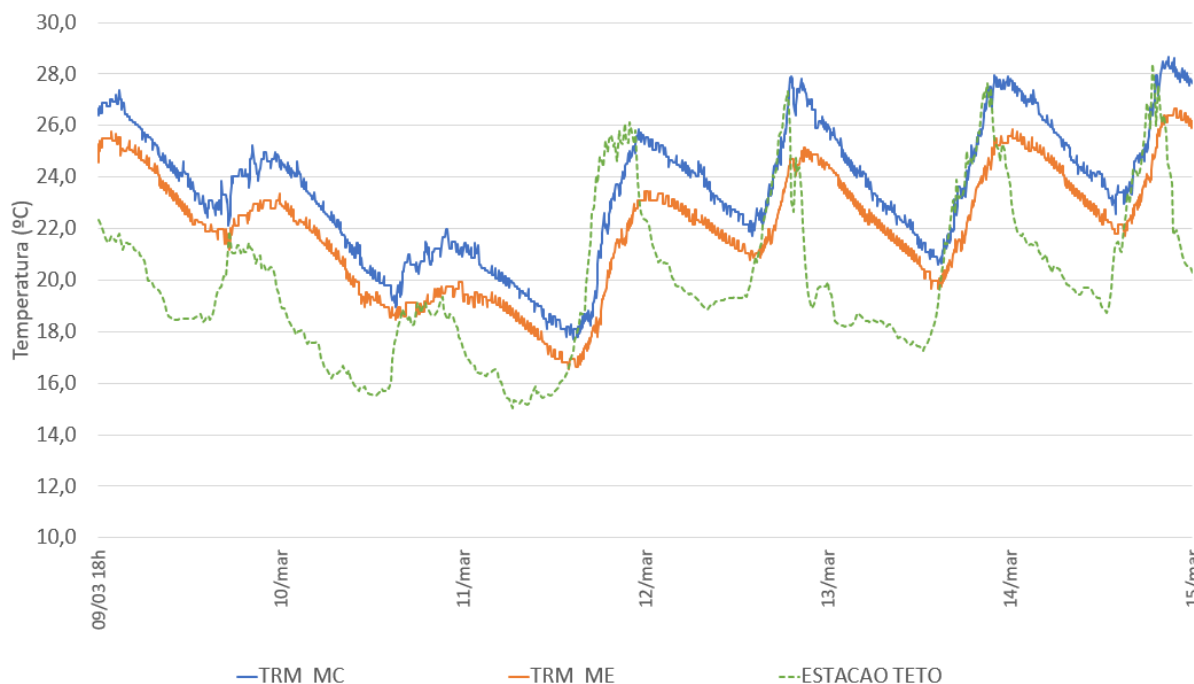
Fonte: Autoria própria

Figura 24 - Temperaturas no interior de ME entre 09 de março e 15 de março



Fonte: Autoria própria

Figura 25 - Variação da temperatura radiante média em MC e ME entre 09 de março e 15 de março



Fonte: Autoria própria

A Figura 25 mostra a temperatura radiante média obtida por meio do procedimento estabelecido pela ISO 7726 (1998). Com este gráfico percebe-se que ME manteve temperaturas mais baixas do que MC. Ou seja, as temperaturas máximas e mínimas diárias foram mais baixas em ME. É possível notar também que a temperatura radiante média teve uma variação diária menor em ME, ou seja, a amplitude térmica em ME foi menor do que em MC.

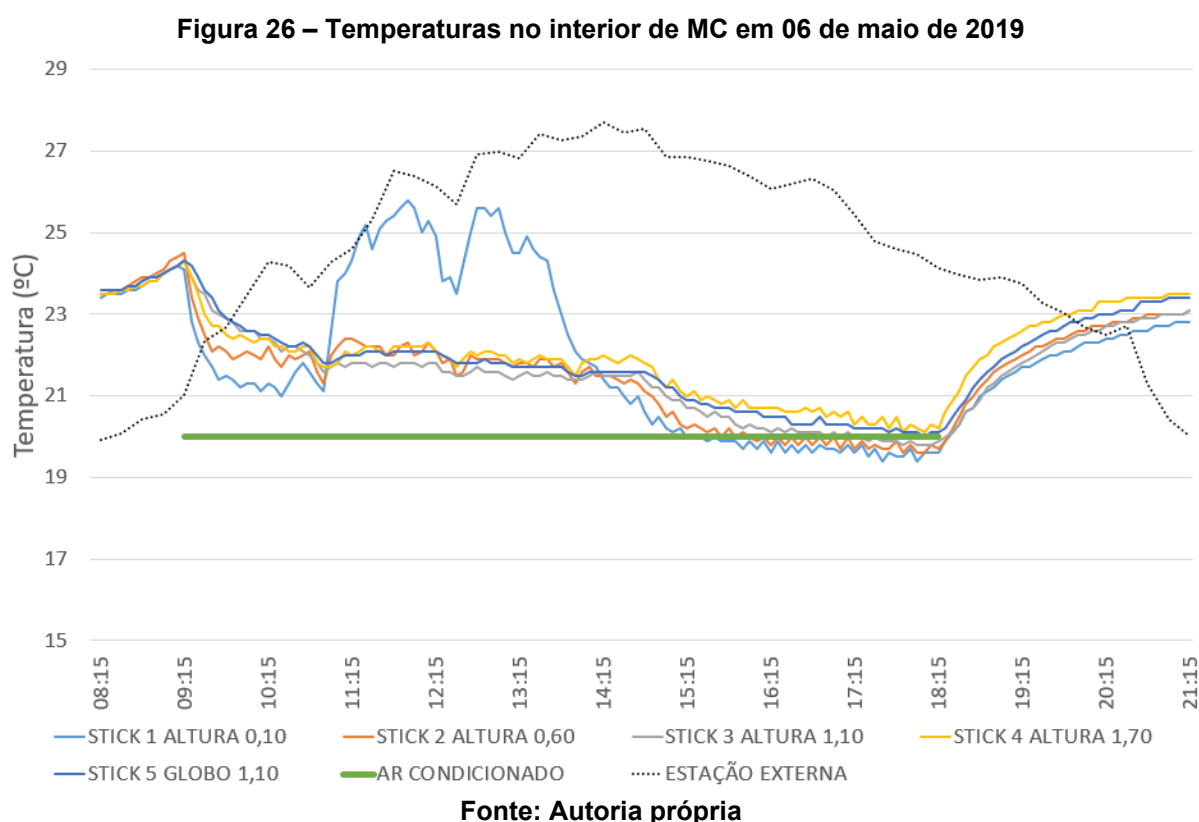
Esse resultado comprova que a instalação de uma janela máximo ar sobreposta à janela de vidro temperado existente permite menos trocas térmicas entre o interior da CBBC e o meio externo em dias quentes, o que é um resultado vantajoso do ponto de vista do conforto térmico.

4.1.2 Monitoramento em Dias Quentes com Ar Condicionado

A fim de estudar as possíveis vantagens da janela duplicada no consumo energético da CBBC, foram feitas medições em dias quentes utilizando o ar condicionado. As seções ocorreram durante o dia 06 de maio, com início às 8h15 e

encerramento às 21h15, sendo que o ar condicionado permaneceu ligado em 20°C entre às 9h15 e às 18h15. Durante o experimento, a temperatura externa mais alta registrada foi de 27,7°C, às 14h15.

Como o período de monitoramento foi maior do que o período de funcionamento do ar condicionado, foi possível analisar a influência da janela tanto na taxa de resfriamento da Câmara, quanto na taxa em que a temperatura interna voltou a se igualar com a externa.

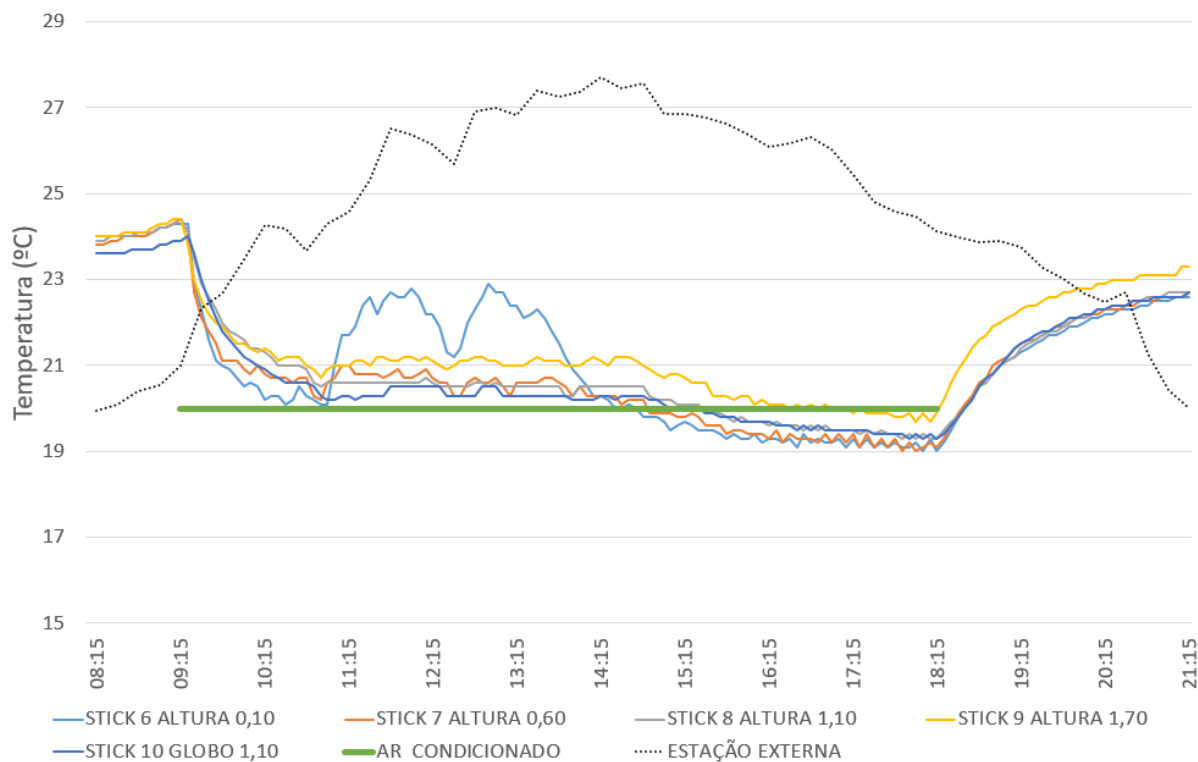


A Figura 26 mostra a variação de temperatura no interior do MC, que possui a janela simples de vidro temperado. Percebe-se que o sensor instalado a 0,10m do piso registrou temperaturas incoerentes com o restante dos dados, provavelmente pela influência da radiação solar direta.

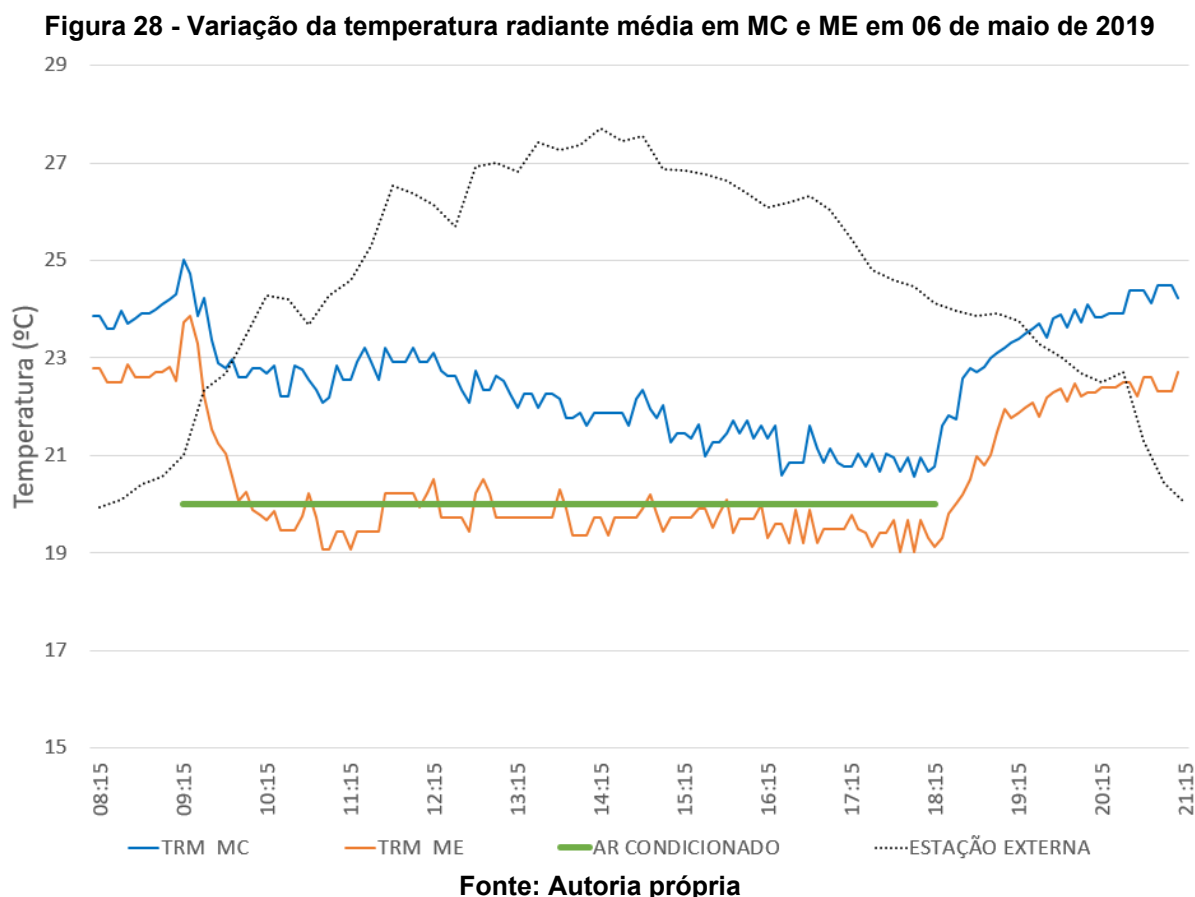
Por mais que o aparelho de ar condicionado tenha sido ligado pela manhã, a temperatura interna só começa a se igualar à temperatura configurada no aparelho por volta das 15h, sendo que o sensor instalado a 1,70m de altura não chegou a registrar 20°C, explicitando a dificuldade em resfriar este ambiente em dias quentes com o uso do ar condicionado.

A Figura 27 ilustra a situação dentro do ME, com a janela duplicada. O sensor instalado a 0,10m do piso também foi influenciado pela radiação solar direta, porém, os demais sensores registraram 20°C mais cedo, a partir das 14h30. Todos os equipamentos de medição acusaram temperaturas inferiores a 20°C.

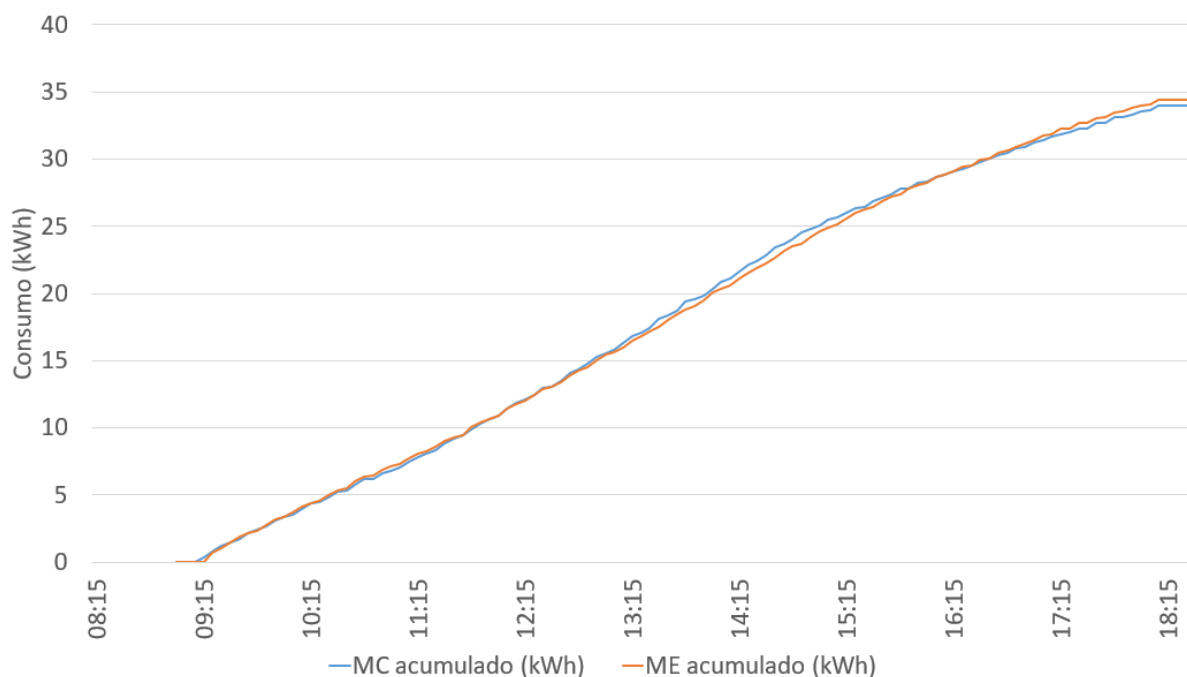
Figura 27 – Temperaturas no interior de ME em 06 de maio de 2019



Fonte: Autoria própria



A Figura 28 destaca a diferença entre a temperatura radiante média em MC e ME. É possível perceber que ME atinge temperaturas mais baixas do que MC. Em menos de uma hora do início do experimento, a temperatura radiante média em ME atinge a temperatura de *setpoint* do ar condicionado, enquanto em MC a temperatura radiante média não chega a atingir 20°C em nenhum momento do dia. Esse fato comprova que ME é mais fácil de ser resfriado em dias quentes utilizando o ar condicionado e reforça a ideia de que o sistema de janelas duplicada contribui para o conforto térmico a medida que possibilita um maior isolamento térmico da CBBC com o meio externo.

Figura 29 – Consumo acumulado dos aparelhos de ar condicionado em MC e ME

Fonte: Autoria própria

Para avaliar o impacto do experimento no consumo energético, foram analisados os dados colhidos no medidor eletrônico multifunção integrado ligado ao disjuntor dos aparelhos de ar condicionado dos dois módulos. No dia 06 de maio de 2019, o consumo energético em MC foi de 33,97kWh, enquanto em ME foi de 34,46kWh. Analisando a Figura 29, que ilustra os dados acumulados colhidos pelo medidor de energia no decorrer do experimento, percebe-se que não houve diferenças consistentes no consumo das duas máquinas ao longo do dia, excetuando alguns picos.

Visto que o ar condicionado foi mais eficiente em resfriar ME, esperava-se que o consumo energético em ME fosse menor, pois o maior isolamento do sistema de janelas duplicadas possibilitaria um desempenho melhor do aparelho. Porém, a análise dos dados resumidos na Figura 29 mostra que o consumo dos dois equipamentos é muito semelhante. Importante ressaltar que os aparelhos de ar condicionado instalados na CBBC são certificados como Classe A pelo Procel e possuem a tecnologia inverter, que regula o fluxo de energia do sistema, alterando a velocidade do compressor. Assim, supõe-se que a diferença entre o consumo não pôde ser percebida devido à alta eficiência energética dos aparelhos.

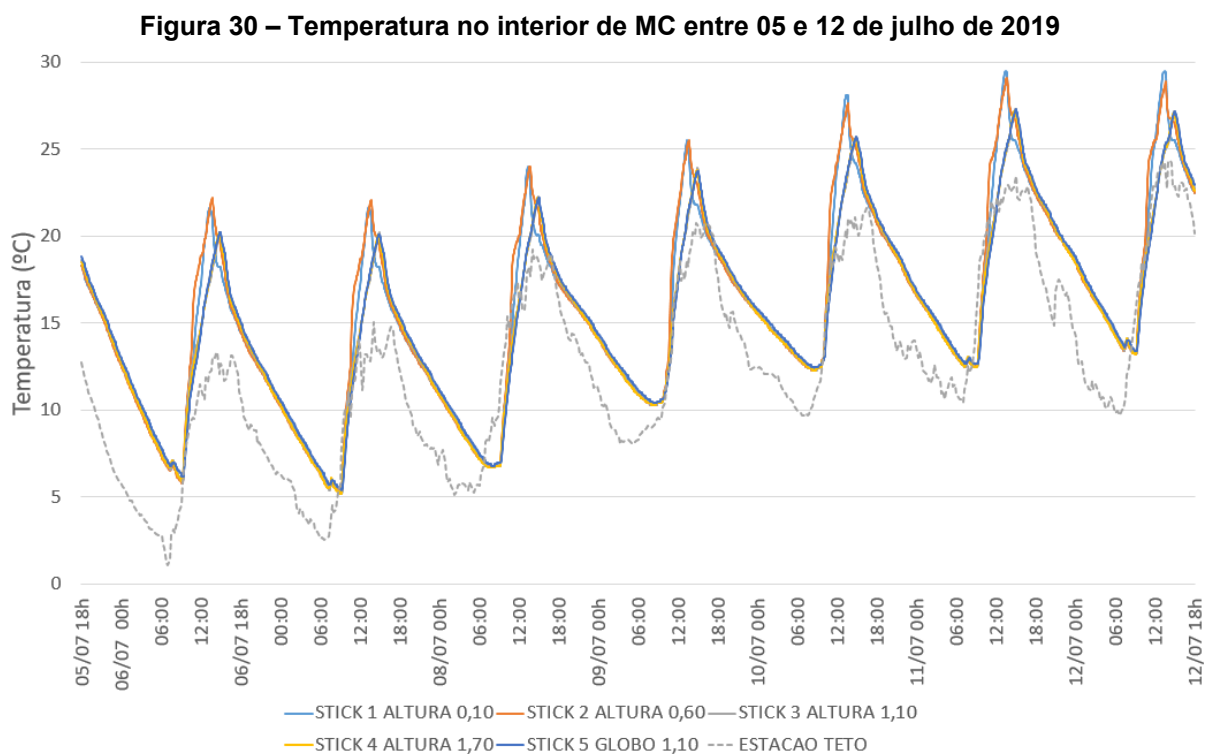
4.2 COMPARAÇÃO DE TEMPERATURAS EM PERÍODO FRIO

Com o referido experimento, buscou-se comparar o comportamento térmico de MC, com janela simples, e ME, com janela duplicada, a fim de identificar possíveis contribuições do fechamento das aberturas para o desempenho térmico da CBBC em dias frios.

Simultaneamente à coleta de dados no interior dos módulos, as condições climatológicas externas foram obtidas com a ajuda de uma estação meteorológica instalada sobre MC. As variáveis adquiridas foram temperatura e umidade do ar e também direção e velocidade do vento.

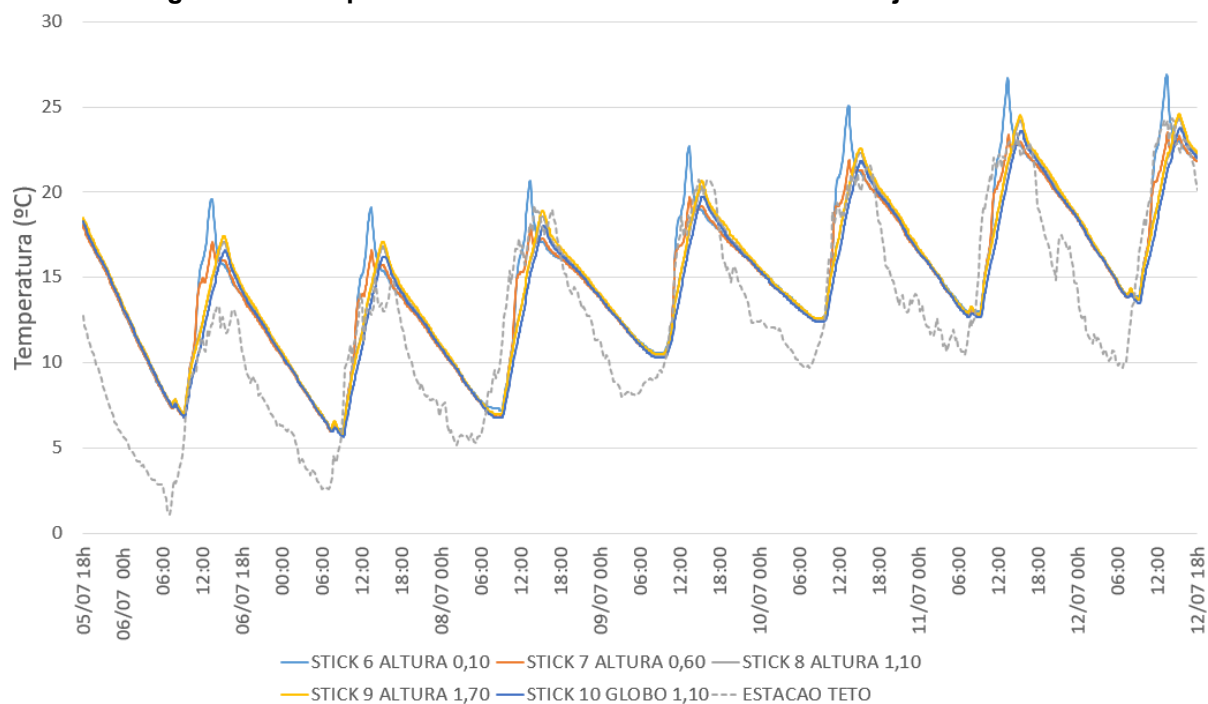
4.2.1 Monitoramento em Dias Frios sem Ar Condicionado

O período de coleta de dados para esta fase da pesquisa aconteceu entre os dias 04 de julho e 13 de agosto de 2019. Porém, para a análise dos dados, foi separado um recorte da semana mais fria do experimento, entre os dias 05 de 12 de julho.



Fonte: Autoria própria

Figura 31 – Temperatura no interior de ME entre 05 e 12 de julho de 2019



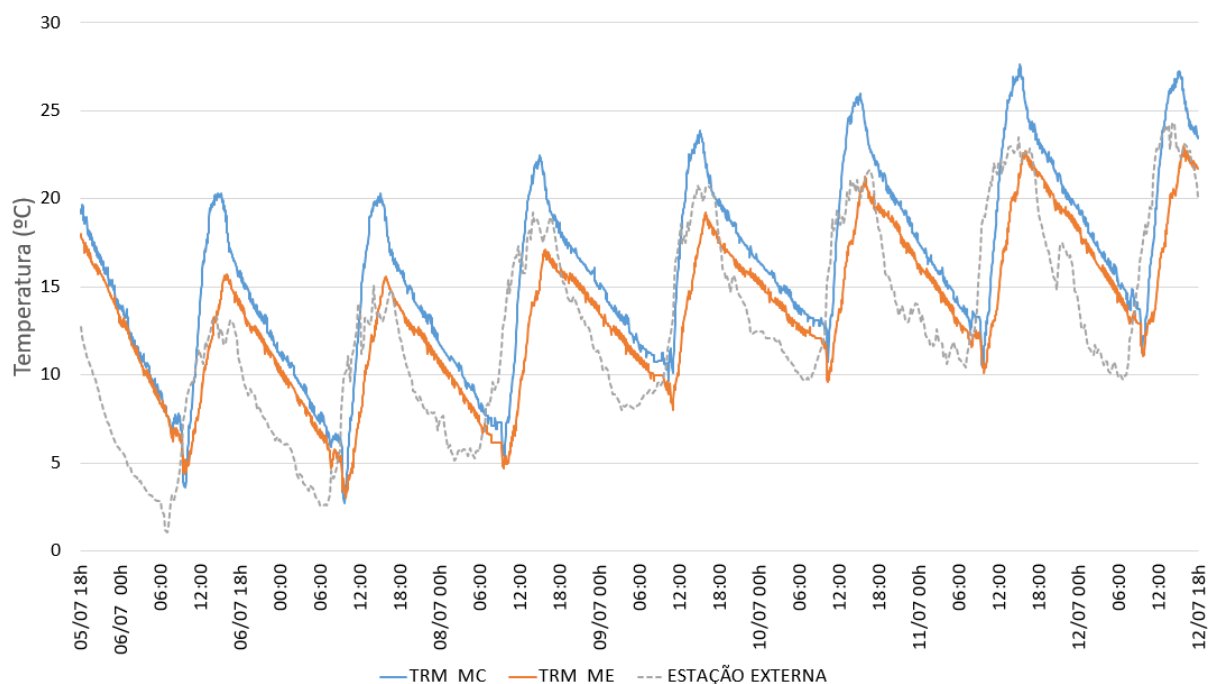
Fonte: Autoria própria

Tanto a Figura 30 quanto a Figura 31 mostram que as temperaturas registradas pelos sensores foi uniforme durante todo o período, não havendo a discrepância notada nas medições do período de verão no sensor mais baixo. Ocorre que, no inverno, um edifício vizinho, à nordeste da CBBC, projeta sombra nos módulos e impede a incidência direta de radiação solar que atinge os sensores mais baixos no verão.

A Figura 32, que compara os dados colhidos nos termômetros de globo dos dois módulos, identifica que MC (com janela simples de vidro temperado) teve temperaturas máximas mais elevadas do que ME (com janela duplicada) e que as temperaturas mínimas dos dois módulos foram semelhantes e superiores às mínimas externas.

Cogita-se que, apesar da falta de vedação nas extremidades da janela simples do MC, o ganho energético seja menor em ME pela baixa transmitância térmica resultante das três lâminas de vidro da janela duplicada e do PVB do vidro laminado.

Figura 32 - Variação da temperatura radiante média em MC e ME entre 05 e 12 de julho



Fonte: Autoria própria

4.2.2 Monitoramento de Dias Frios com Ar Condicionado

Para análise dos dados de temperatura em dias frios com ar condicionado foi selecionado o período entre as 4h00 do dia 2 e as 8h00 do dia 5 de julho de 2019. O ar condicionado permaneceu ligado entre as 8h50 do dia 2 e as 17h05 do dia 4 de julho. A máxima temperatura externa no período foi 25,3°C, registrada às 13h45 do dia 2, e a mínima foi 10,9°C, às 5h15 do dia 5, após o aparelho de ar condicionado já ter sido desligado. O *setpoint* do ar condicionado foi 23°C e o sensor instalado na aleta da evaporadora pôde registrar a variação de temperatura do ar insuflado pelo aparelho.

Na Figura 33 observa-se que a temperatura radiante média no interior de ME se manteve mais baixa do que a de MC em todo o período avaliado. No início do experimento, os dois módulos da CBBC registravam temperaturas abaixo da temperatura externa.

Após o início do funcionamento do ar condicionado, MC atingiu a temperatura de *setpoint* em 7h00, porém, durante os 3 dias analisados, registrou temperatura acima de 23°C apenas no período da tarde, quando a temperatura externa estava mais alta. Ou seja, no período da manhã, quando a temperatura

externa é mais baixa, o aparelho de ar condicionado não conseguiu manter a temperatura interna acima da temperatura de *setpoint*, reforçando a ideia de que a janela simples de vidro temperado permite grande troca de calor com o meio externo, dificultando a manutenção de temperatura mais alta no interior de MC.

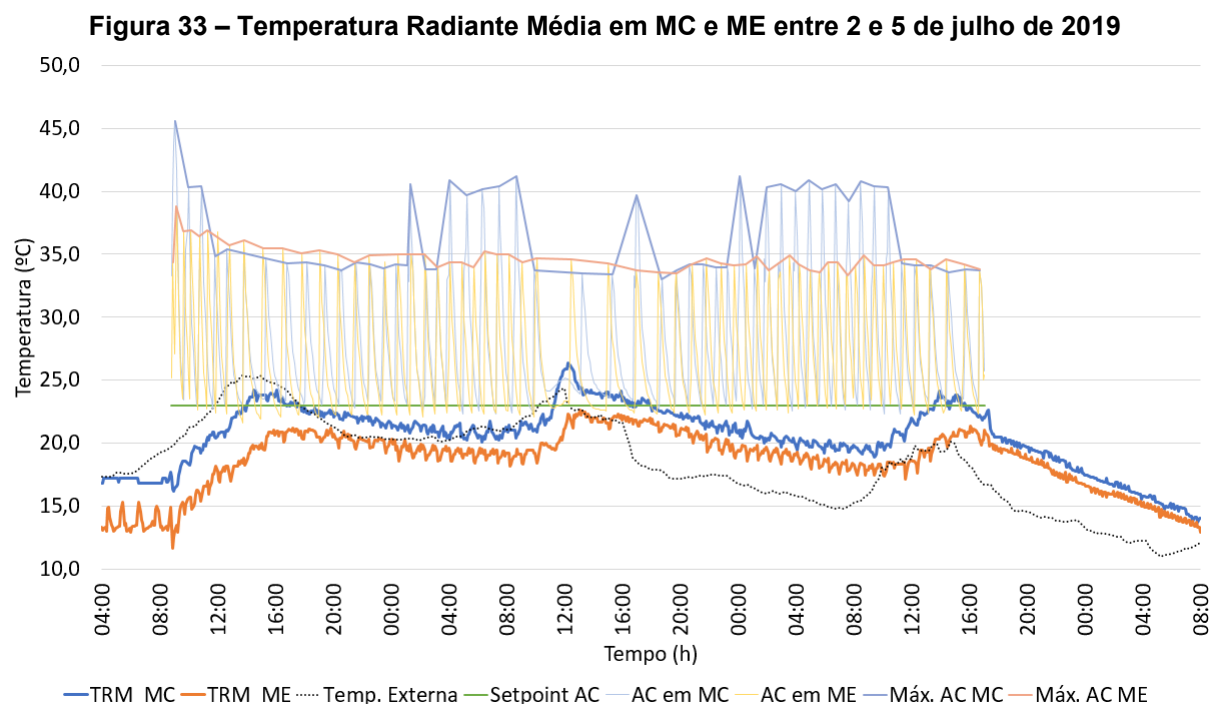
ME, no entanto, não chegou a registrar temperatura acima de 23°C, reportando temperatura abaixo da externa durante todo o primeiro dia de experimento e toda a manhã do segundo dia. Este não era o comportamento esperado para estas condições. Esperava-se que as temperaturas em ME fossem maiores do que em MC, uma vez que o sistema de janelas duplicadas permitiria maior isolamento de ME e, conseqüentemente, o aparelho de ar condicionado conseguiria manter temperaturas mais altas no interior do módulo por todo o período de experimento.

Ainda analisando os dados dispostos na Figura 33, é possível perceber que o ar condicionado de MC insuflou ar significativamente mais quente do que o de ME. Portanto, apesar das temperaturas mais baixas em ME, não se pode afirmar que o papel da janela duplicada na retenção do calor foi irrelevante, visto que o desempenho dos dois aparelhos de ar condicionado não foram semelhantes.

Pelo contrário, observa-se que após o desligamento dos equipamentos de ar condicionado, MC apresentou uma queda de 2,7°C em 1h00, enquanto ME teve queda de 1,1°C no mesmo período. Esta queda mais acentuada de temperatura em MC reforça a ideia de que o sistema de janelas duplicadas favorece o isolamento térmico da CBBC, uma vez que dificulta a perda de calor para o meio externo.

Caso a janela duplicada não tivesse interferência no isolamento da Câmara, esperava-se que a perda de calor após o desligamento do ar condicionado fosse semelhante e constante nos dois módulos. Porém, em MC a constância na perda de calor acontece uma hora após o encerramento do experimento. Durante essa primeira hora, a perda de calor em MC é drástica, enquanto o resfriamento de ME é menos acentuado.

Portanto, sendo a janela o único diferencial entre os dois módulos, pode-se afirmar, baseado nesse experimento, que o sistema de janela duplicada influencia a manutenção de calor no interior da CBBC em dias frios quando utilizado aquecimento mecânico.



Fonte: Autoria própria

4.3 COMPARAÇÃO DE DADOS DE ILUMINAÇÃO NATURAL

Buscou-se comparar a iluminância no interior de MC, com janela simples, e ME, com janela duplicada, a fim de identificar possíveis contribuições das diferentes camadas de vidro para o desempenho lumínico da CBBC.

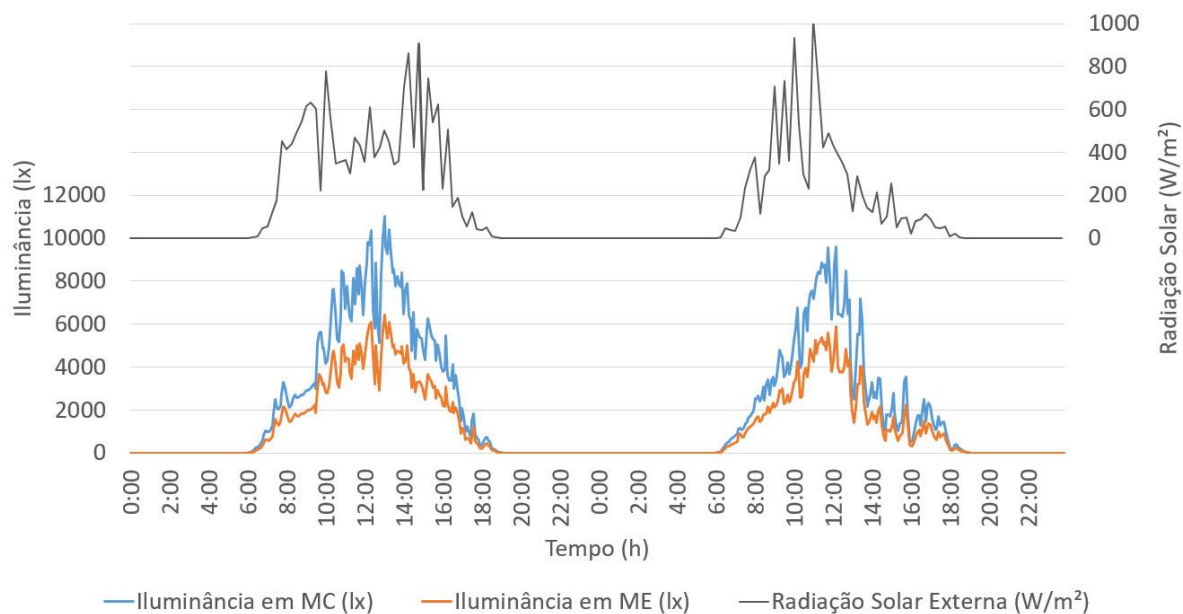
Simultaneamente à coleta de dados no interior dos módulos, radiação solar externa foi obtida com a ajuda de um piranômetro instalado em plano horizontal, voltado para o zênite.

Os resultados mostraram que a iluminância foi maior no interior de MC nos dois dias, conforme mostra a Figura 34, sugerindo que o sistema de janela duplicada de ME interfere na iluminância no interior da CBBC.

Visto que no experimento de monitoramento de temperatura em dias frios sem ar condicionado as temperaturas máximas foram maiores em MC do que em ME, contrariando as expectativas, esse resultado corrobora com a ideia de que o ganho energético em ME é menor como consequência dos baixos ganhos solares obtidos pelo sistema de janela duplicada.

As três lâminas de vidro da janela duplicada somadas ao PVB do vidro laminado estariam contribuindo tanto para a baixa transmitância térmica do sistema quanto para os menores níveis de iluminância dentro de ME.

Figura 34 - Variação da iluminância em MC e ME nos dias 29 de fevereiro e 1 de março de 2020

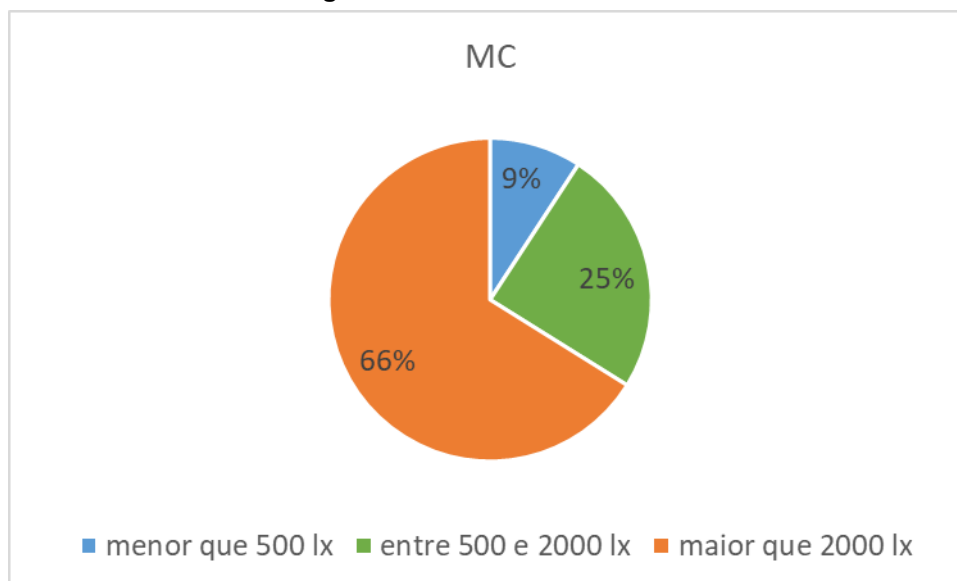


Fonte: Autoria própria

Nos dias em que foram efetuadas as medições, o nascer do sol se deu às 6h10 e o pôr do sol aconteceu às 18h50, resultando em 12h40 de período diurno em cada dia. Durante os dois dias de experimento, entre o nascer e o pôr do sol, os registros de MC computaram 2h20 com iluminância abaixo de 500 lux, 6h15 entre 500 e 2.000 lux e 16h45 acima de 2.000 lux. Em ME os registros foram de 4h00 com iluminância abaixo de 500 lux, 9h05 entre 500 e 2.000 lux e 12h15 acima de 2.000 lux.

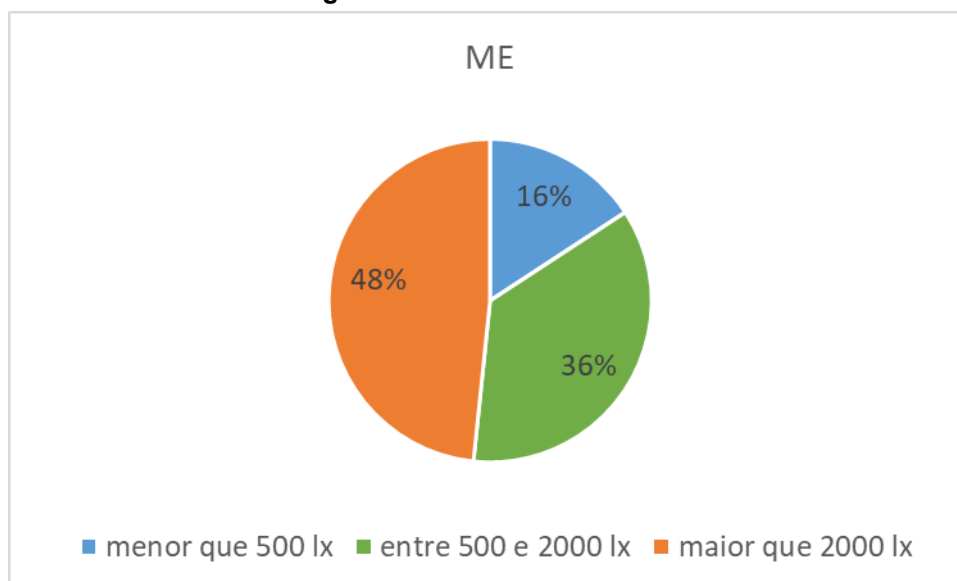
Considerando as normas NBR ISO/CIE 8995 (ABNT, 2013) e NHO 11 (FUNDACENTRO, 2018), que estabelecem a iluminância mínima de 500 lux sobre o plano de trabalho em ambientes de escritório, e o critério de *Useful Daylight Illuminance* (UDI) desenvolvido por Nabil e Mardaljevic (2015) que estabelece iluminância máxima de 2.000 lux sobre o plano de trabalho, conclui-se que ME registrou mais tempo em condições de conforto lumínico – considerando apenas a contribuição da luz natural – conforme explicitado na Figura 35 (MC) e na Figura 36 (ME).

Figura 35 - Iluminância em MC



Fonte: Autoria própria

Figura 36 - Iluminância em ME



Fonte: Autoria própria

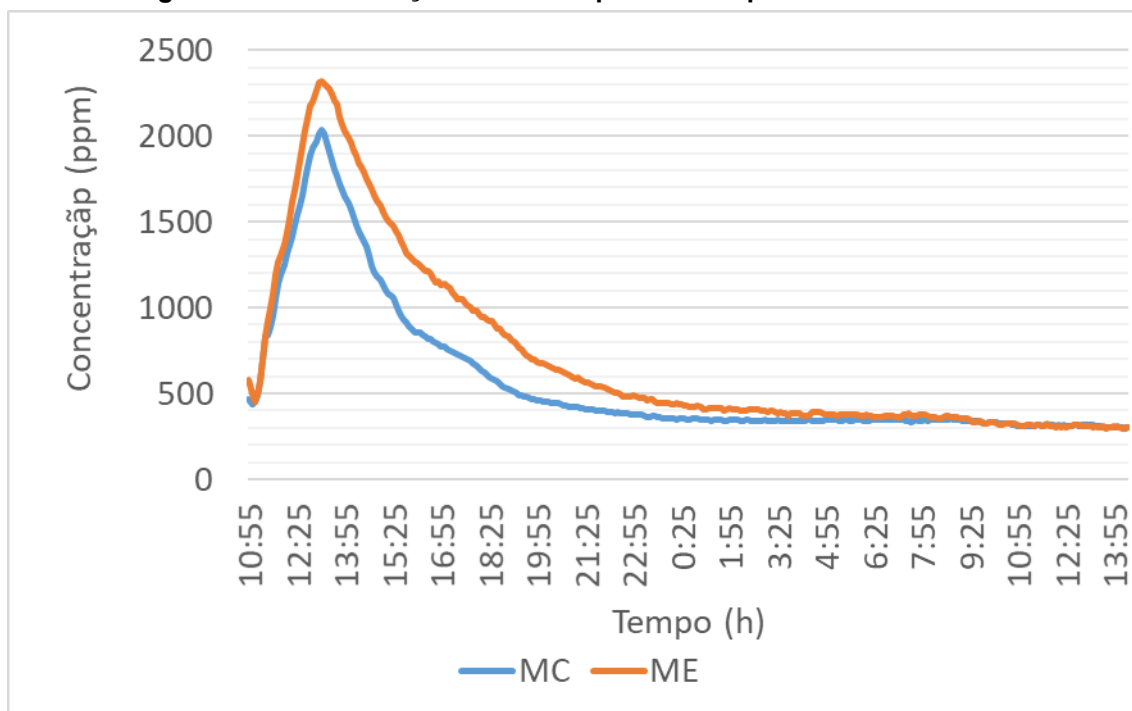
4.4 COMPARAÇÃO DE DADOS DE CONCENTRAÇÃO DE CO₂

Nas duas etapas de monitoramento observou-se que a concentração de CO₂ dentro de ME aumentou mais rapidamente do que em MC e, após a saída dos ocupantes, atingiu estabilidade com o exterior em menos tempo. As duas etapas mostraram que o decaimento do gás em MC foi maior do que em ME.

Na primeira etapa (Figura 37) ME atingiu 2.000 ppm em 1h40 enquanto a concentração do gás em MC demorou 2h10 para atingir o mesmo valor. No momento em que os voluntários saíram simultaneamente dos módulos as concentrações de CO₂ em MC e ME estavam em 2.032 e 2.318 ppm respectivamente. Para o cálculo da taxa de renovação do ar e da concentração normalizada, essas foram consideradas as concentrações no momento inicial.

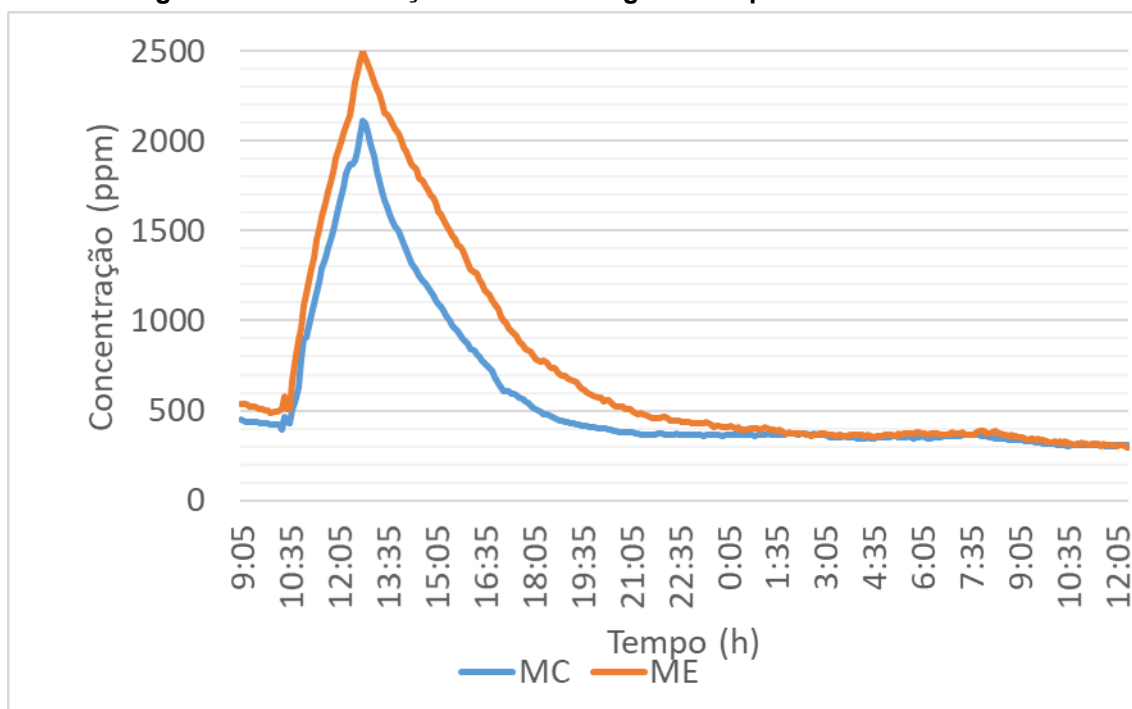
Na segunda etapa (Figura 38) ME atingiu 2.000 ppm em 2h00 enquanto a concentração do gás em MC demorou 2h30 para atingir o mesmo valor. No momento em que os voluntários saíram simultaneamente dos módulos as concentrações de CO₂ em MC e ME estavam em 2.110 e 2.496 ppm respectivamente. Para o cálculo da taxa de renovação do ar e da concentração normalizada na segunda etapa, essas foram consideradas as concentrações no momento inicial.

Figura 37 - Concentração de CO₂ na primeira etapa de monitoramento



Fonte: Autoria própria

Figura 38 - Concentração de CO₂ na segunda etapa de monitoramento



Fonte: Autoria própria

A taxa de renovação do ar pôde ser calculada utilizando o método do decaimento segundo a metodologia definida na norma ASTM E 741 / 2006. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra a taxa de renovação do ar em MC e ME nas duas etapas de monitoramento considerando a primeira hora do experimento. Multiplicando-se a taxa de renovação do ar pelo volume de cada módulo ($13,49\text{m}^3$), tem-se a vazão em cada um dos módulos, conforme Tabela 8.

Observa-se que a taxa de renovação do ar – e, conseqüentemente, a vazão – é maior em MC nas duas etapas de monitoramento. Este resultado é compatível com o esperado, pois o sistema de janela máximo ar tem uma vantagem de vedação se comparado ao sistema de correr, visto que seu fechamento se dá sobre pressão ao invés de sobreposição de peças. A hipótese de que o ganho termoacústico é consequência da melhor vedação do sistema duplo, traçada no capítulo 1, também é corroborada com esses resultados.

Tabela 7 - Taxa de renovação do ar (h^{-1}) em MC e ME

	MC	ME
ETAPA 1	0,30	0,20
ETAPA 2	0,33	0,18

Fonte: Autoria própria

Tabela 8 - Vazão do ar (m^3/h) em MC e ME

	MC	ME
ETAPA 1	4,11	2,70
ETAPA 2	4,55	2,50

Fonte: Autoria própria

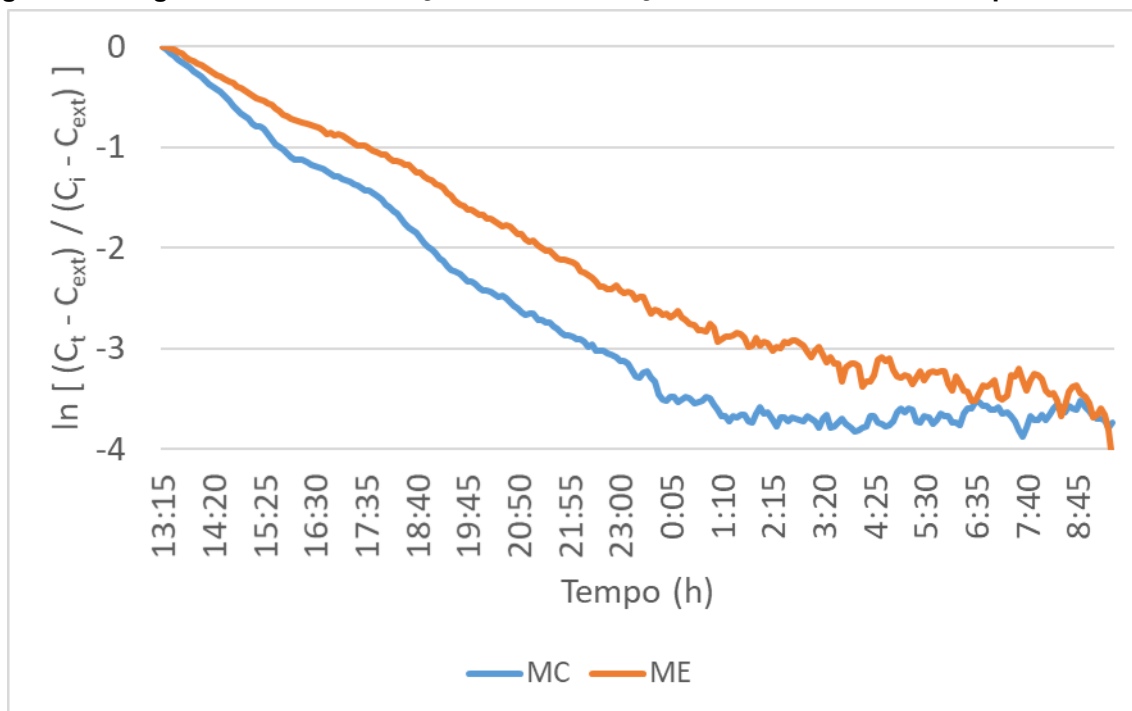
Os dados obtidos são similares aos reportados por Santos (2008), que utilizou o mesmo método para obtenção de taxa de renovação de ar através do monitoramento de CO_2 , conforme previsto na ASTM E 741/2006.

O estudo, que teve como objetivo determinar a taxa de renovação horária em quartos de dormir em edifícios multifamiliares, estimou valores entre $0,20$ e $0,40\text{h}^{-1}$ para renovação horária em um dos compartimentos avaliados (SANTOS, 2008).

Para estabelecer a concentração normalizada (C_N) de MC e ME e, assim, comparar o decaimento de CO_2 de MC e ME nas duas etapas, foram utilizados os

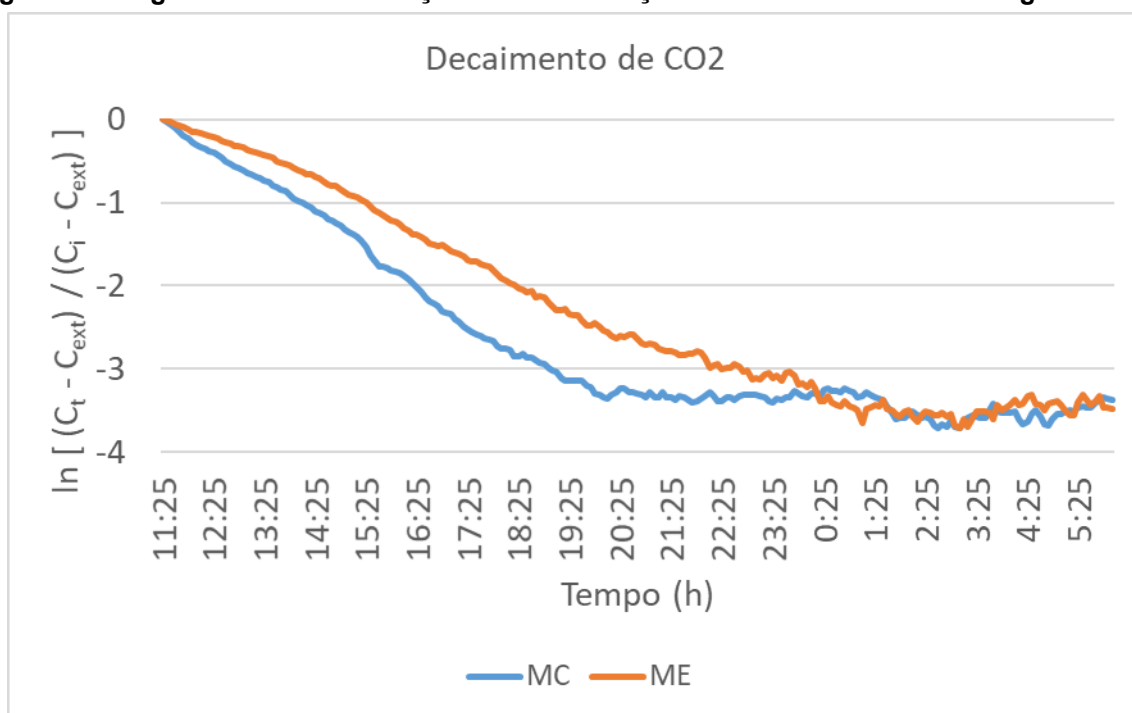
dados concentração de gás através do tempo (C_t) obtidos a cada 5 minutos pelos sensores. A concentração de gás no ambiente externo (C_{ext}) foi considerada 300 ppm, valor próximo ao mínimo obtido dentro de cada módulo.

Figura 39 - Logaritmo de normalização da concentração de CO₂ em MC e ME na primeira etapa



Fonte: Autoria própria

Figura 40 - Logaritmo de normalização da concentração de CO₂ em MC e ME na segunda etapa



Fonte: Autoria própria

Observa-se que tanto na primeira (Figura 39) quanto na segunda etapa (Figura 40) o decaimento da concentração de CO₂ foi mais acentuado em MC do que em ME. Os níveis de CO₂ em MC e ME tendem a se equiparar e, após algumas horas, a curva de decaimento perde inclinação tornando-se mais horizontal, indicando que a concentração de CO₂ dentro dos módulos está próxima da concentração externa.

Na primeira etapa este ponto de equilíbrio acontece cerca de 11 horas após o início do experimento em MC e cerca de 14 horas em ME. Na segunda etapa o equilíbrio é perceptível mais cedo, cerca de 8 horas após o início em MC e cerca de 13 horas em ME.

Os resultados obtidos nesse experimento sugerem que o sistema de janela duplicada possui vedação melhor do que o sistema de janela em vidro temperado. Como visto em capítulos anteriores, a vedação nas bordas da janela de vidro temperado é frágil e deve ser o principal fator para diminuir a sensação de conforto térmico e acústico dentro da CBBC.

A comparação de dados de CO₂ em MC e ME mostrou que houve melhora na vedação da janela com a instalação do sistema duplicado, fato este que deve ser responsável por ganhos no conforto termoacústico da Câmara. Porém, cabe

ressaltar que a maior estanqueidade em ME pode levar à diminuição da qualidade do ar pelo acúmulo de CO₂, o que deve ser combatido com algum sistema de ventilação mecânica ou natural que não prejudique o desempenho térmico e acústico da CBBC.

4.5 COMPARAÇÃO DOS DADOS DE ACÚSTICA

Os resultados das medições de abril de 2018 em MC podem ser vistos na **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Os resultados das medições em ME, tanto em abril de 2018 – antes da instalação da janela duplicada – quanto em abril de 2019 podem ser vistos na Tabela 10. É possível perceber, analisando os valores absolutos, que após a instalação da janela duplicada, ME registrou níveis de pressão sonora mais baixos do que MC e ME com a janela simples em todas as frequências.

Tabela 9 - Nível de pressão sonora ponderado em A para MC

Frequência (Hz)	MC abril 2018 [dB(A)]		
	1	2	3
100	44,95	46,42	44,7
125	48,34	45,85	52,66
160	50,05	47,77	49,76
200	50,6	49,22	50,37
250	50,94	48,64	51,57
315	50,21	48,08	50,36
400	50,35	48,36	52,98
500	51,8	49,9	53,18
630	54,21	51,81	54,11
800	58,13	55,58	56,3
1000	60,22	58,19	58,49
1250	58,89	57,29	57,21
1600	56,05	54,61	54,66
2000	53,81	52,73	53,06
2500	52,42	51,41	51,38
3150	50,37	49,73	49,06

Fonte: Autoria própria

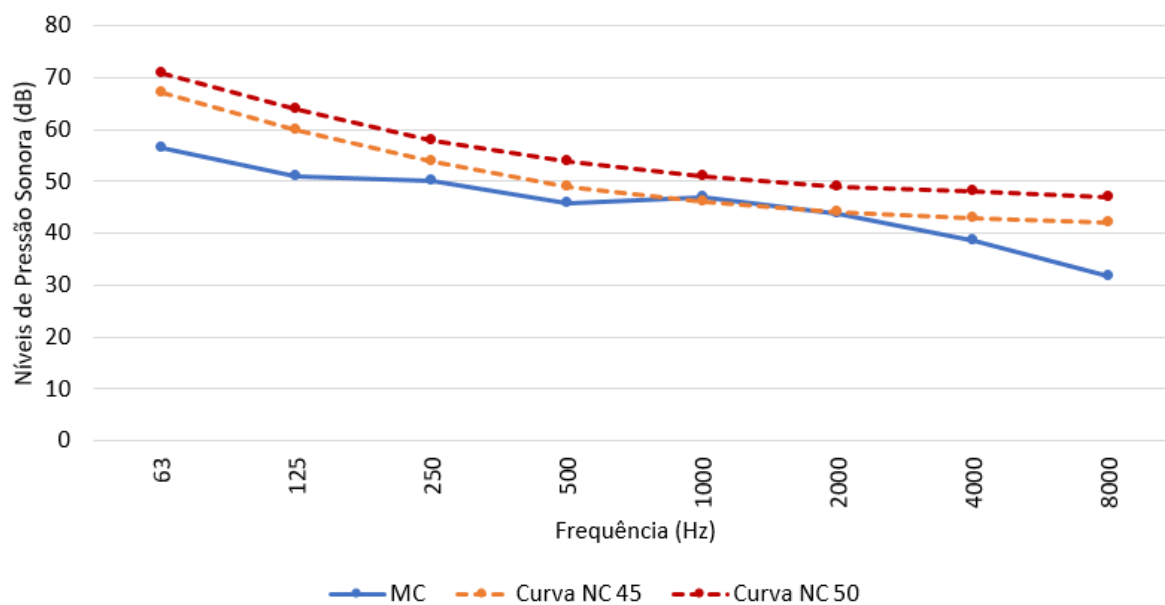
Tabela 10 - Nível de pressão sonora ponderado em A para ME

Frequência (Hz)	ME abril 2018 [dB(A)]			ME abril 2019 [dB(A)]			
	1	2	3	1	2	3	4
100	47,47	44,79	48,26	24,55	22,19	23,21	23,98
125	50,72	44,33	51,04	26,22	24,45	25,68	25,65
160	47,19	46,19	48,17	28,3	28,15	27,05	28,15
200	48,05	47,8	49,05	24,58	30,46	24,44	26,17
250	49,22	48,88	49,04	27,02	31,1	28,16	28,4
315	48,26	49,67	48,63	26,41	30,39	28,55	28,89
400	51,09	47,06	48,97	26,6	29,12	26,79	27,61
500	51,65	49,05	49,33	28,93	31,15	27,73	28,82
630	52,06	50,87	50,65	28,6	31,45	26,85	28,21
800	54,87	53,91	52,86	29,47	31,27	27,3	28,94
1000	56,19	55,38	54,45	30,89	32,4	28,44	28,39
1250	55,17	54,15	53,45	29,66	31,4	26,78	27,79
1600	52,97	51,03	50,77	27,19	30,68	24,33	25,57
2000	50,66	49,47	49,42	27,05	28,45	24,08	24,92
2500	48,61	47,95	47,88	25,58	25,85	22,56	23,1
3150	46,38	46,64	46,07	24,19	25,21	22,28	21,81

Fonte: Autoria própria

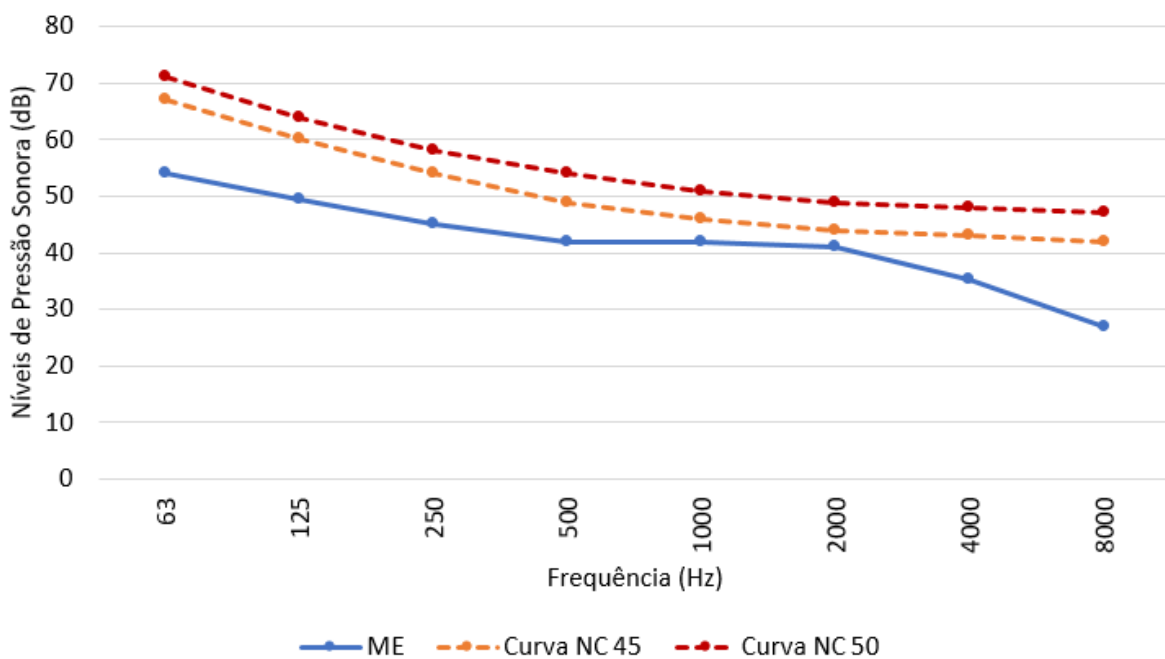
A Figura 41 e a Figura 42 trazem os resultados das medições em MC e ME feitas em abril de 2018, comparando-os com as curvas NC normatizadas pela NBR 10152/2017 Versão Corrigida:2020. Observa-se que MC (Figura 41) está dentro da curva NC50, ficando acima do recomendado pela NBR 10152/2017 Versão Corrigida:2020 tanto para escritórios privativos (NC 35), quanto para escritórios coletivos (NC 40). Já para ME (Figura 42), os níveis de pressão sonora estão abaixo do recomendado pela curva NC 45, ficando dentro do recomendado pela NBR NBR 10152/2017 Versão Corrigida:2020 (considerando a tolerância de 5dB(A) para o nível NC) para escritórios coletivos (NC 40) e acima do recomendado para escritórios privativos (NC 35).

Figura 41 - Análise espectral da média das medições para MC (abril 2018)



Fonte: Adaptado de Trevisan (2019)

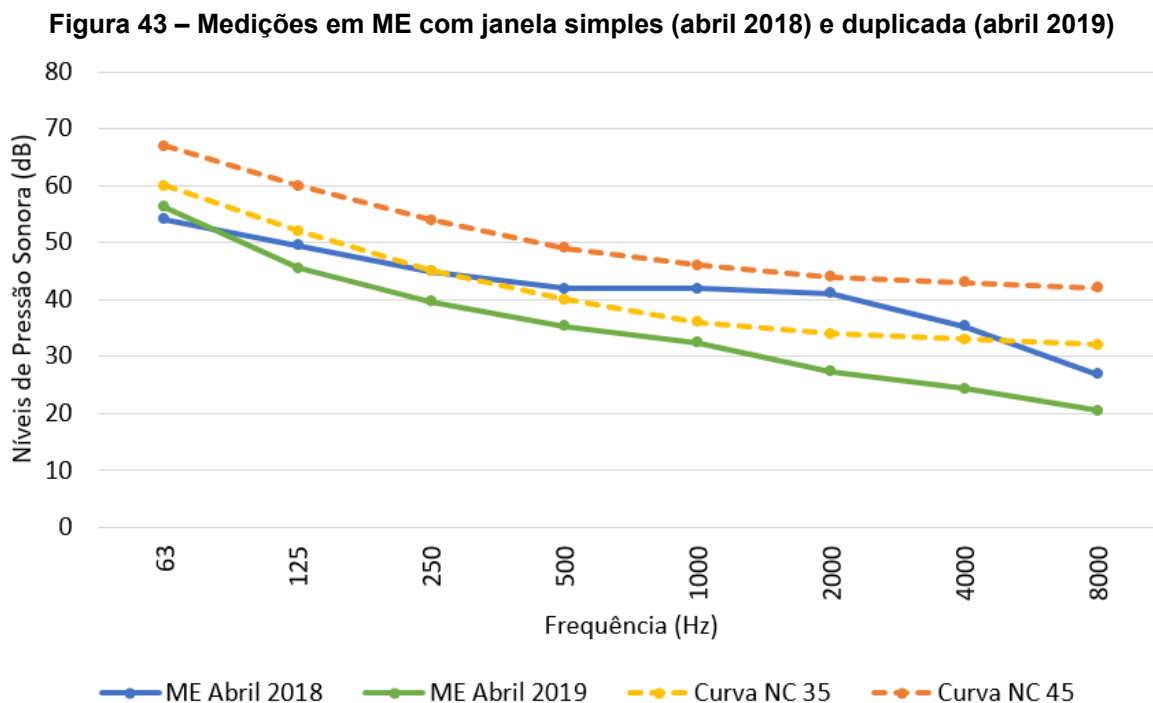
Figura 42 - Análise espectral da média das medições para ME (abril 2018)



Fonte: Adaptado de Trevisan (2019)

Após a instalação da janela sobreposta em ME, nas medições de abril de 2019, verificou-se nova situação para o nível de pressão sonora interno. Conforme visto na Figura 43, os níveis de pressão sonora obtidos no módulo com janela

duplicada reclassificaram ME quanto às curvas NC, enquadrando-o nos parâmetros recomendados para uso como escritório privativo (NC 35).



Fonte: Adaptado de Trevisan (2019)

Verifica-se, portanto, que instalação sobreposta da janela levou à redução do nível de pressão sonora equivalente do ambiente interno, bem como à reclassificação quanto à curva NC, sendo esta reduzida da NC 45 para a NC 35.

Destaca-se que, para a medição com a nova esquadria, foi adotado o intervalo de 5 minutos entre as medições, ao invés dos 15 minutos adotados para as medições em MC e ME com esquadria simples. Esse protocolo está em conformidade com a NBR 10152/2017 Versão Corrigida:2020, que solicita um tempo mínimo de medição de 30 segundos.

4.6 SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Apresenta-se aqui uma tabela (Tabela 11) que visa sintetizar os resultados obtidos, possibilitando fácil comparação entre as condições de conforto ambiental observadas em MC, com janela de vidro temperado e sem esquadria, e em ME, com sistema de janela duplicada.

Tabela 11 - Síntese dos resultados obtidos

	Janela Simples MC	Janela Duplicada ME
Dias Quentes	Temperaturas mais alta	Temperaturas mais baixa
	Resfria mais lentamente	Resfria mais rapidamente
Dias Frios	Temperaturas mais alta	Temperaturas mais baixa
Amplitude Térmica	Maior	Menor
Iluminação Natural	Menos tempo dentro dos parâmetros de conforto (entre 500 e 2000lx)	Mais tempo dentro dos parâmetros de conforto (entre 500 e 2000lx)
Estanqueidade	Menor estanqueidade	Maior estanqueidade
Isolamento Acústico	Menor	Maior

Fonte: Autoria própria

5 CONCLUSÕES

Este trabalho buscou analisar como janelas influenciam as condições de conforto ambiental da CBBC e implementou janelas duplicadas no módulo experimental da Câmara.

Uma vez instalada uma janela tipo máximo ar, esquadria em alumínio branco, montantes preenchidos com isopor e vidro laminado incolor (4+4mm) sobreposta à janela existente em ME, foram conduzidos diversos testes no intuito de comparar a eficiência dos dois sistemas de esquadrias: a esquadria simples em vidro temperado (6mm) remanescente em MC e o conjunto que foi denominado janela duplicada em ME.

Tanto em dias quentes quanto em dias frios, ME teve menor amplitude térmica do que MC, o que torna a CBBC mais eficiente do ponto de vista do conforto ambiental, visto que a NBR 15220/2005 aponta que as estratégias de condicionamento térmico passivo para a Zona Bioclimática 1, na qual Curitiba está incluída, recomendam uso de envoltória com grande isolamento térmico.

Considera-se que no verão a janela duplicada foi mais eficiente, visto ME teve temperaturas máximas mais baixas sem o uso de ar condicionado e, quando utilizado resfriamento artificial, ME atingiu temperaturas mais baixas em menos tempo.

Já no inverno, os testes indicaram que, apesar da vedação insuficiente, a janela simples proporcionou temperaturas mais altas em MC. Como demonstrado no experimento de comparação de dados de iluminação natural, a utilização de três vidros no conjunto de janela duplicada diminuiu a iluminância dentro de ME e pode ter contribuído para diminuir os ganhos de calor por incidência solar no ambiente interno.

Do ponto de vista do conforto lumínico, por outro lado, a diminuição dos valores de iluminância com a utilização da janela duplicada foi positivo, uma vez que, com isso, o plano de trabalho ficou exposto mais tempo aos parâmetros de conforto, entre 500 e 2000lux, reduzindo o tempo de ofuscamento dentro de ME.

A janela duplicada mostrou-se acusticamente mais eficiente do que a janela simples, uma vez que os ensaios medindo níveis de pressão sonora identificaram menor intensidade de ruídos no interior de ME.

Como consequência da melhor vedação do sistema duplo, ME registrou menos trocas de ar do que MC, o que pode influenciar na qualidade do ambiente interno caso o ocupante permaneça por muito tempo dentro da CBBC sem abrir portas e janelas.

O presente estudo identificou o impacto da janela em vidro temperado e da janela duplicada no desempenho termoacústico da CBBC, avaliou a estanqueidade desses dois tipos de janela janelas e analisou as condições de conforto ambiental proporcionadas pelas janelas no interior da CBBC.

Com isso, este trabalho tornou a CBBC mais eficiente do ponto de vista do conforto ambiental e alcançou o objetivo de analisar como as esquadrias e os vidros de janelas influenciam as condições de conforto no interior da Câmara.

A hipótese de que a instalação de uma nova janela, sobreposta à existente, formando um sistema duplo, pode melhorar as condições de conforto termoacústico no interior da CBBC foi, portanto, comprovada. Também foi confirmado que o ganho termoacústico está relacionado com a vedação da janela, o que influencia na qualidade do ambiente interno uma vez que a alta concentração de CO₂ pode ser prejudicial ao ser humano. Portanto, cabe ressaltar a importância da renovação de ar no interior da CBBC.

Esta dissertação incluiu experimentos relacionados aos aspectos térmico, acústico, lumínico e de estanqueidade de dois tipos de janela, compreendendo uma avaliação global da situação e se destacando por analisar um grande número de variáveis que influenciam no conforto ambiental e se relacionam com a substituição da janela de vidro temperado simples pela janela duplicada.

Decorridos os experimentos, pode-se afirmar que a instalação de janela duplicada em ME melhorou as condições de conforto ambiental dentro da CBBC, uma vez que melhorou o isolamento térmico e acústico do módulo, assim como diminuiu o tempo em que o plano de trabalho fica exposto a condições de ofuscamento. Com isso, a Câmara fica apta a contribuir com resultados mais precisos em estudos futuros.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao finalizar essa pesquisa, constatou-se que existe um grande potencial de estudos a serem desenvolvidos contemplando aspectos relacionados à janela duplicada. A fim de contribuir para o melhoramento da CBBC, seguem algumas sugestões para trabalhos futuros.

Sugere-se, primeiramente, que o sistema duplicado seja instalado também em MC e que sejam feitas verificações térmicas, acústicas, lumínicas e de estanqueidade a fim de assegurar a similaridade entre MC e ME e, assim, proporcionar um ambiente favorável para a utilização da CBBC em estudos comparativos de conforto ambiental.

Quanto à estanqueidade dos módulos da Câmara, cumpre destacar a importância de se estudar uma alternativa de baixo custo para proporcionar uma ventilação adequada sem, no entanto, prejudicar o desempenho termoacústico da CBBC.

Finalmente, recomenda-se o desenvolvimento de estudos sobre o comportamento dos usuários a fim de investigar como o manuseio das esquadrias em detrimento do uso do ar condicionado para o conforto ambiental impactam no consumo de energia da Câmara.

REFERÊNCIAS

AL HERR, Y.; ARIF, M.; KATAFYGIOTOU, M.; MAZROEI, A.; KAUSHIK, A.; ELSARRAG, E. Impact of indoor environmental quality on occupant well-being and comfort: A review of the literature. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v.5, n.1, p. 1-11, 2016.

AMARILLA, R. S. D.; AVELAR, M.; RIBEIRO, R. S.; CATAI, R. D.; SOUSA, R. P.; MATOSKI, A. Modelagem acústica: processo de avaliação de poluição sonora em um Campus Universitário na Cidade de Curitiba - Paraná. In: XXVIII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica. **Anais...** Porto Alegre: SOBRAC, 2018.

ANH B.-L.; KIM J.-H.; JANG C.-Y.; LEIGH S.-B.; JEONG H. Window retrofit strategy for energy saving in existing residences with different thermal characteristics and window sizes. **Building Services Engineering Research Technology**, v. 37, n.1, p. 19-32, 2015.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **E 741-00 – Standard test method for determining air change in a single zone by means of a tracer gas dilution**. West Conshohocken: ASTM, 2006.

_____. **Guideline 10P, Interactions Affecting the Achievement of Acceptable Indoor Environments, Second Public Review**. Atlanta, 2010.

_____. **Handbook of fundamentals. American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers**. Atlanta, 2005.

_____. **Standard 55-2010: Thermal comfort conditions for human occupancy**. Atlanta, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO/CIE 8995 – Iluminação de ambientes de trabalho, Parte 1: Interior**. São Paulo: ABNT, 2013.

_____. **NBR 10151 – Acústica - Medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas - Aplicação de uso geral**. São Paulo: ABNT, 2020a.

_____. **NBR 10152 – Acústica — Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações.** São Paulo: ABNT, 2020b.

_____. **NBR 10821 – Esquadrias para edificações.** São Paulo: ABNT, 2017.

_____. **NBR 14125 – Alumínio e suas ligas – Tratamento de superfície – Requisitos para revestimento orgânico para fins arquitetônicos.** São Paulo: ABNT, 2016.

_____. **NBR 15220 – Desempenho térmico de edificações.** São Paulo: ABNT, 2005.

_____. **NBR 15575 – Edificações habitacionais: desempenho.** São Paulo: ABNT, 2013.

_____. **NBR 16401 –Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários Parte 3: Qualidade do ar interior.** Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

AYR, U.; CIRILLO, E.; FATO, I.; MARTELLOTTA, F. A new approach to assessing the performance of noise indices in buildings. **Applied Acoustics**, v. 64, n. 2, p. 129-145, 2003.

BAKER, P. H.; VAN DIJK, H. A. L. PASLINK and dynamic outdoor testing of building components. **Building and Environment**. 43 143-151, 2008.

BERANEK, L. Revised criteria for noise in buildings. **Noise Control**, v.3, n.1, p.19-27, 1957

BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle de ruído.** São Paulo: Blücher, 2011.

BLATCHFORD, D.; HOLZBAUER, M.; INGRAM, D. L.; SHARMAN, D. F. Responses of the pituitary-adrenal system of the pig to environmental changes and drugs. **British Journal of Pharmacology**, v.62, n.2, p.241-254, Cambridge, 1978.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Portaria INMETRO nº 449:** aprova o Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de

Edificações Residenciais. 25 de novembro de 2010. Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/residencial/downloads/Anexo1RTQ-R.pdf> Acesso em: 10 de março de 2020.

CARVALHAIS, C. A. A. **Contribuição para o estudo da tolerância humana a ambientes térmicos extremos: ensaios de validação de câmara climática.** Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Segurança e Higiene Ocupacionais), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.

CARVALHO, R.P. **Acústica arquitetônica.** 2ª edição. Brasília: Thesaurus, 2010.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). **Desempenho de edificações habitacionais: guia orientativo para atendimento à Norma ABNT NBR 15575/2013.** Fortaleza: Gadioli Cipolla Comunicação, 2013.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). **Esquadrias para edificações: Desempenho e aplicações.** Brasília: CBIC/SENAI, 2017.

CAMPBELL, D. T.; STANLEY, J. C. **Delineamentos experimentais e quase-experimentais de pesquisa.** São Paulo: editora Edusp, 1979.

CARLOS, J. S.; CORVACHO, H.; SILVA, P. D.; CASTRO-GOMES, J. P. The contribution of a double ventilated window to the energy efficiency of a building. **Advances in Energy Research**, v.7, Hauppauge, 2010.

COELHO, R. V.; ROHDEN, A. B. Custo para implantação dos níveis de desempenho acústico da NBR 15575 em sistemas de vedações verticais. **Revista de Engenharia Civil IMED**, vol. 5, n. 2, p. 35-53, Passo Fundo, 2018.

COORDENAÇÃO GERAL DE ACREDITAÇÃO DO INMETRO (CGCRE). **DOQCGCRE-028: Orientação para calibração de câmaras térmicas sem carga.** Revisão 01, Mar/2013. Rio de Janeiro: INMETRO, 2013.

DE BOTTON, A. **A arquitetura da felicidade.** Rio de Janeiro: editora Rocco, 2007

DE DEAR, R.; BRAGER, G.; COOPER, D. **Developing an adaptative model of thermal comfort and preference.** ASHRAE Transactions Technical Report No. 884, 1997.

DRAKE, C. **Environmental test capabilities of the Air Force McKinley Climatic Laboratory**. 23rd Aerospace Sciences Meeting, Reno, 1985.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Indoor Air Quality and Student Performance**. Washington: EPA, 2000.

FANGER, P. O. **Thermal comfort-analysis and applications in environmental engineering**. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.

FISK, W. J. How IEQ affects health, productivity. **ASHRAE Journal**, v. 57, p. 56-58, 2002.

FLUKE. **FLUKE Ti9 Infrared Camera**. Disponível em: <https://www.fluke.com/en/product/thermal-imaging/thermal-cameras/fluke-ti9>. Acesso em: 14.out.2019.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual do conforto térmico**. São Paulo: editora Studio Nobel, 2001.

FUNDACENTRO. **NHO11 – Avaliação dos níveis de iluminação em ambientes internos de trabalho: procedimento técnico**. São Paulo: NHO, 2018.

GERGES, S. N. Y. **Ruído: Fundamentos e Controle**. Florianópolis: Editora UFSC, 1992.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Editora Atlas, 2002.

GIVONI, B. **Man, Climate and Architecture**. Londres: Applied Science Publishers, 1976.

GUSTAVSEN A., JELLE B.P., ARASTEH D., KOHLER C. **State-of-the-art highly insulating window frames – Research and market review**. Project Report 6, SINTEF Building and Infrastructure, 2007.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Energy efficiency 2018: Analysis and outlooks to 2040**. Market Report nº 6, 2018

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION (ISO). **ISO 7726 – Ergonomics of the thermal environment: instruments for measuring physical quantities.** Genebra: ISO, 1998.

JELLE, B. P.; HYND, A.; GUSTAVSEN, A.; ARASTEH, D.; GOUDEY, H.; HART, R. Fenestration of today and tomorrow: A state-of-the-art review and future research opportunities. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 96, 1–28, 2012.

KAVISKI, F. **Desempenho térmico de cobertura vegetada sobre guarita de fibra de vidro exposta a diferentes condições climáticas.** Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

KINGMA, B. R. M.; SCHWEIKER, M.; WAGNER, A.; VAN PARKEN LICHTENBELT, W. D. Exploring internal body heat balance to understand thermal sensation. **Building Research & Information**, v. 45, n. 7, p. 808-818, 2017.

KLÆBOE, R.; AMUNDSEN, A.H., FYHRI, A.; SOLBERG, S. Road traffic noise – the relationship between noise exposure and noise annoyance in Norway. **Applied Acoustics**, v. 65, p. 893-912, 2004.

KRÜGER, E. L. **Construção de câmara climática para experimentos nas áreas de conforto ambiental e arquitetura bioclimática.** Projeto aprovado no Edital Universal MCTI/CNPq nº 01/2016, processo nº 431153/2016-7. Curitiba: UTFPR, 2016.

KRÜGER, E. L.; TAMURA, C. A.; BRÖDE, P.; SCHWEIKER, M.; WAGNER, A. Shortand long-term acclimatization in outdoor spaces: Exposure time, seasonal and heatwave adaptation effects. **Building and Environment**, v. 116, p. 17-29, 2017.

KIDO, E. M.; CYWIŃSKI, Z. Aesthetic perception of steel-glass architecture in Japan. **Stahlbau**, 85(6), 515-526, Berlin, 2017.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura.** São Paulo: Eletrobrás Procel, 2014.

LANGKILDE, G. **From Laboratory of Heating and Ventilation to International Centre for Indoor Environment and Energy.** DTU Byg, Danmarks Tekniske Universitet. DTU Civil Engineering Technical Report, No. SR 10-08, UK, 2010.

LANZINHA, J. C.; PINTO, M.; FREIRE, T.; ALVES, A. **Qualidade do ambiente interior em lares e jardins de infância na cidade de Covilhã – estudo exploratório**. International Conference on Engineering UBI 2015, Covilhã, 2015.

LIU, M.; HEISELBERG, P. K.; LARSEN, O. K.; MORTENSEN, L.; ROSE, J. Investigation of different configurations of a ventilated window to optimize both energy efficiency and thermal comfort. **Energy Procedia**, v.132, 478-483, 2017.

LONG, L.; YE, H.; GAO, Y.; ZU, R. Performance demonstration and evaluation of the synergetic application of vanadium dioxide glazing and phase change material in passive buildings. **Applied Energy**, v.136, p.89-97, 2014.

LONG, L.; YE, H. Nano-based chromogenic technologies for building energy efficiency. **Start-Up Creation**, p.213-236, 2016.

LONG, M. **Architectural acoustics**. Cambridge: Elsevier Academic Press, 2014.

MACNAUGHTON, P.; SATISH, U.; LAURENT, J.G.C.; FLANIGAN, S.; VALLARINO, J.; COULL, B.; SPENGLER, J. D.; ALLEN, J. G. The impact of working in a green certified building on cognitive function and health. **Building and Environment**, v. 114, p. 178-186, 2017.

MANKIBI, M.; CANTIN, R.; ZOUBIR, A. Contribution to the thermal renovation of old buildings: Numerical and experimental approach for characterizing a double window. **Energy Procedia**, v.78, p. 2470-2475, 2015.

MC NEIL, A.; KOHLER, C.; LEE, E.; SELKOWITZ, S. **High performance building mockup in FLEXLAB**. Berkeley: LBLN, 2014.

MEMARI, A. **Curtain wall systems: a primer**. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 126, 2013.

MENDONÇA, F. A.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

MINAYO, M. C. de S. **Pesquisa social: teoria, método e criatividade**. 7. ed. Petrópolis: Vozes, 1997.

MÖHLENKAMP, M.; WESSELING, M.; WICK, A.; GORES, I.; MÜLLER, D. Thermal comfort of displacement ventilation in environments with different mean room temperatures. In: 9th Windsor Conference: Making Comfort Relevant. **Proceedings...** Windsor: Windsor Conference, 2016.

NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. Useful Daylight Illuminance: A New Paradigm to Access Daylight in Buildings. **Lighting Research & Technology**, v. 37, n. 1, p. 41-59, 2005.

NIKOLOPOULOU, N; BAKER, N; STEEMERS, K. Improvements to the globe thermometer for outdoor use. **Architectural Science Review** 42: 27 – 34. 1999.

OLGYAY, Victor. **Arquitetura y Clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas**. 5a. ed. Barcelona: Gustavo Gili, 2008.

OLIVEIRA, M. A. **Estudo da eficiência da duplicação de janelas na melhoria do isolamento acústico destes componentes**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

ORNSTEIN, S. W. **Post-Occupancy Evaluation in Brazil**. Evaluating Quality in Educational Facilities. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), p. 135–143, 2005.

PACHECO, R.; ORDÓÑES, J.; MARTÍNEZ, G. Energy efficient design of building: A review. **Renewable and Sustainable Energy Review**, 16, 3559-3573, 2012.

PALLUBINSKY, H.; SCHELLLEN, L.; KINGMA, B. R. M.; DAUTZENBERG, B.; VAN BAAK, M. A.; VAN MARKEN LICHTENBELT, W. D. Thermophysiological adaptations to passive mild heat acclimatation. **Temperature**, v. 4, n. 2, p. 176-186, 2017.

PALLASMAA, J. **Essências**. São Paulo: Gustavo Gili, 2018.

PARATI, L.; FARBOOD, B. P.; BORGHI, M. May Retrofit Also Include Acoustics Aspects? **Energy Procedia**, 78, 158–163, 2015

PIMENTEL, M. A. G.; FARONI, L. D.; GUEDES, R. N. C.; GONÇALVES, J. R.; OLIVEIRA, C. R. F. Eficácia biológica de bifentrina aplicado em milho armazenado

sob diferentes temperaturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 2, p. 263-267, Campina Grande, 2005.

PINTO, A.; SILVA, F.; MAMEDE, M. **Avaliação experimental da permeabilidade ao ar da envolvente e do sistema de ventilação. Edifício “Gaioleiro” (1880): Contributos para uma reabilitação sustentável.** Conferência Nacional iiSBE Sustentabilidade na Reabilitação Urbana, Lisboa, 2012.

RAO, P. Infrared thermography and its applications to civil engineering. **Indian Concrete Journal**, v.82, n.5, p. 41-50, 2008.

REGNIER, C.; MATHEW, P.; ROBINSON, A.; SCHWARTZ, P.; WATER, T. Beyond Widgets – Systems Incentive Programs for Utilities. **ACAEE**, p. 1-12, 2016.

RIBEIRO, R. S.; AMARILLA, R. D. **Relatório de ruído ambiental no entorno da Câmara Bioclimática de Baixo Custo (CBBC).** Curitiba: UTFPR, 2018.

ROCHA, M. H.; QUALHARINI, E. L. Modelagem gerencial de sistemas de manutenção predial em edificações históricas. In: **Congresso Construção 2001**, v. 1, p.137-144, Lisboa, 2001.

ROULET, C.-A.; FORADINI, F. Simple and cheap air change rate measurement using CO₂ concentration decays. **International Journal of Ventilation**, n.1, 2002.

SADINENI, S. B.; MADALA, S.; BOEHM, R. F. Passive building energy savings: A review of building envelope componentes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 15, 3617-3631, 2011.

SANTOS, J. P. **Avaliação experimental dos níveis de qualidade do ar interior em quartos de dormir: Um caso de estudo.** Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil), Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2008.

SARWAR, G.; CORSI, R.; ALLEN, D.; WESCHLER, C. The significance of secondary organic aerosol formation and growth in buildings: experimental and computational evidence. **Atmospheric Environment**, v. 37, p. 1365-1381, 2003.

SCHERER, M. J. **Estudo do isolamento sonoro de vidros de diferentes tipos e espessuras, em vitragem simples e dupla.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

SCHMID, A. L. **A ideia de conforto: reflexões sobre o ambiente construído.** Curitiba: editor Pacto Ambiental, 2006.

SCHOFFELEN, P. F. M.; WESTERTERP, K. R.; SARIS, W. H. M.; HOOR, F. T. A dual-respiration chamber system with automates calibration. **Journal of Applied Physiology**, v. 83 n. 6, p. 2064-2072, 1997.

SCHWEIKER, M.; BRASCHE, S.; HAWIGHORST, M.; BISCHOF, W.; WAGNER, A.. Presenting LOBSTER, an innovative climate chamber, and the analysis of the effect of ceiling fan on the thermal sensation and performance under summer conditions in an office-like setting. In: 8th Windsor Conference: Counting the cost of comfort in a changing world. **Proceedings...** Windsor: Windsor Conference, 2014.

SEPPÄNEN, O.; FISK, W. J. Some quantitative relations between indoor environmental quality and work performance or health. **International Journal of HVAC&R Research**, v.12, p. 40-53, 2005.

SECRETARIA MUNICIPAL DE TRÂNSITO – SETRAN. **Relatório de fluxo de veículos de setembro de 2015.** Brasil, 2015.

SILVA, E; **Uma introdução ao projeto arquitetônico.** Porto Alegre: editora UFRGS, 1998.

SILVEIRA, F. M. **Análise do desempenho térmico de edificações residenciais ventiladas naturalmente: NBR 15575 e ASHRAE 55.** Dissertação (Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo) Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 2014.

SINGH, A.; SYAL, M.; GRADY, S. C.; KORKMAZ, S. Effects of Green Buildings on Employee Health and Productivity. **American Journal of Public Health**, v. 100, n. 9, p. 1665-1668, 2010.

SOUSA, A. A. S. R.; LIMA, P. S.; SOARES, G. N.; HEINECK, L. F. M. Análise paramétrica do custo de construção com base orçamentária da revista guia da construção. In: 10º Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção. **Anais...** Fortaleza: Marketing Aumentado, 2017.

STAZI, F.; NASPI, F.; ULPIANI, G.; DI PERNA, C. Indoor air quality and thermal comfort optimization in classrooms developing an automatic system for windows openings and closings. **Energy and Buildings**, v.139, p.732-746, 2017.

STERLING, T.D.; COLLETT, C.; RUMEL, D. The epidemiology of "sick buildings". **Rev. Saúde pública**, São Paulo, 25: 56-63, 1991.

STRACHAN, P. A.; VANDAELE, L. Case studies of outdoor testing and analysis of building components. **Building and Environment**, v. 43, n. 2, p. 129–142, 2008.

TALEGHANI, M.; TENPIERIK, M.; KURVERS, S.; VAN DEN DOBBELSTEEN, A. A review into thermal comfort in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 26, p. 201–215, 2013.

TOFTUM, J.; LANGILDE, G.; FANGER, P. O. New indoor environment chambers and field experiment offices for research on human comfort, health and productivity at moderate energy expenditure. **Energy and Buildings**, v.36, p. 899-903, 2004.

TAMURA, C. A. **Simulação de insolação: implantação da CBBC na UTFPR Sede Ecoville**. Memorial. Curitiba: UTFPR, 2017

THORSSON, S.; LINDBERG, F.; ELIASSON, I.; HOLMER, B. Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. **International Journal of Climatology**. V. 27, p. 1984-1993, 2007.

TREVISAN, L. Y. I. **Concepção, construção e verificação da aplicabilidade de uma Câmara Bioclimática de Baixo Custo em estudos de conforto ambiental**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Curitiba, 2019.

TREVISAN, L. Y. I.; KRÜGER, E. L.; FERNANDES, L. C.; TAMURA, C. A. Proposta de construção de câmara climática móvel de baixo custo para estudos de ambiência térmica no Brasil. In: XIV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...** Balneário Camboriú: ANTAC, 2017.

TREVISAN, L. Y. I.; CARDOSO, A.; GOMES, B. L. M.; KRÜGER, E. L.; IZZO, R. L. S. Utilização de uma câmara climática como instrumento de ensino de conforto ambiental. In: XLV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2017, Joinville. **Anais...** Brasília: ABENGE, 2017.

TREVISAN, L. Y. I.; SHIBATA, R.; CELLIGOI, G.; SILVA, D. L.; KRÜGER, E. L. Avaliação Pós-Ocupação de uma Câmara Bioclimática de Baixo Custo: a percepção do ocupante no diagnóstico de um ambiente construído. **Ambiente Construído**, 2019 (no prelo).

UNIVERSITY OF TEXAS IN AUSTIN (UTA). Building Energy and Environment. Austin, 2019. Disponível em: <https://www.cae.utexas.edu/bee/> Acesso em: 21 jun. 2019.

VAN LENGEN, J. **Manual do arquiteto descalço**. Porto Alegre: Livraria do Arquiteto, 2004.

WANG, C.; SI, Y.; ABDUL-RAHMAN, H.; WOOD, L. C. Noise annoyance and loudness: Acoustic performance of residential buildings in tropics. **Building Services Engineering and Technology**, v.36, n.6, p. 680-700, 2015.

WESTPHAL, F. S. **Manual técnico do vidro plano para edificações**. São Paulo: ABIVIDRO, 2016.

WIJERS, L. J.; SARIS, W. H. M.; VAN MARKEN LICHTENBELT, W. D. Cold-induced adaptative thermogenesis in lean and obese. **Obesity**, v. 18, n. 6, p.1092-1099, 2012.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Indoor air quality: biological contaminants (Report). Rautavaara: WHO, 1988.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Environmental noise guidelines for the European Region**. Copenhagen: WHO, 2018.

WYON, D. The effects of indoor air quality on performance and productivity. **Indoor Air**. v. 14, n. 7, p. 92-101, 2004.

YE, H.; LONG, L.; ZHANG, H.; XU, B.; GAO, Y.; KANG, L.; CHEN,Z. The demonstration and simulation of the application performance of the vanadium dioxide single gazing. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v.117, p.168-173, 2013.

ZHAI, Z.; PREVITALI, J. M. Ancient vernacular architecture: characteristics categorization and energy performance evaluation. **Energy and Buildings**, 42, 357 – 365, 2010.