INFLUÊNCIA DE JANELA DUPLICADA NA QUALIDADE DO AMBIENTE INTERNO DE UMA CÂMARA BIOCLIMÁTICA DE BAIXO CUSTO

Gabriel Celligoi (1); Livia Yu Iwamura Trevisan (2); Eduardo Krüger (3)
(1) Mestre, Arquiteto e Urbanista, gabrielcelligoi@gmail.com, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Curitiba – Sede Ecoville, Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 4900 – 81280-340, Curitiba/PR, Tel. +55 41 3779-7093
(2) Doutora, Arquiteta e Urbanista, livia.yu@unila.edu.br, Universidade Federal da Integração Latino-Americana – UNILA, Av. Silvio Américo Sasdelli, 1842, 85866-000, Foz do Iguaçu/PR, Tel. +55 45 3522-9765
(3) Doutor. Engenheiro Civil, ekruger@utfpr.edu.br, Departamento de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Campus Curitiba - Sede Ecoville, Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 4900 - 81280-340 Curitiba/PR, Tel. +55 41 32794521

RESUMO
No presente artigo é apresentada análise sobre a influência de um sistema de janela duplicada em condições de conforto térmico, lumínico, acústico e de qualidade do ar, buscando avaliar o impacto da duplicação de janelas na qualidade do ambiente interno de uma Câmara Bioclimática de Baixo Custo. Com o monitoramento de variáveis e comparação dos resultados obtidos no Módulo Controle e no Módulo Experimental da Câmara, verificou-se que o sistema de janela duplicada foi responsável pela diminuição da amplitude térmica, manutenção de temperaturas mais baixas em dias quentes, aumento de isolamento acústico e diminuição de períodos de ofuscamento por incidência de luz natural. Por outro lado, como consequência da melhor vedação, o sistema duplo foi responsável por diminuir as trocas de ar na Câmara, o que suscita uma reflexão quanto ao equilíbrio entre conforto ambiental e a importância da renovação de ar, sobretudo após o estabelecimento da pandemia de COVID-19.

Palavras-chave: janela, qualidade do ambiente interno, conforto ambiental, COVID-19.

ABSTRACT
This paper analyses the influence of a duplicated window system in thermal, luminous and acoustic comfort as well as air quality, seeking to evaluate the impact of duplicating windows on the indoor environmental quality of a Bioclimatic Chamber. Monitoring variables and comparing the results obtained in the Control Module and the Experimental Module, it was found that the duplicated window system was responsible for decreasing the thermal amplitude, maintaining lower temperatures on hot days, increasing sound insulation and reduction of periods of glare. On the other hand, as a result of the better sealing, the double system was responsible for reducing air change in the Chamber, which instigates the reflection about the balance between environmental comfort and the importance of air renewal, especially after the establishment of the COVID-19 pandemic.

Keywords: window, indoor environmental quality, environmental comfort, COVID-19.

1. INTRODUÇÃO

As janelas são elementos-chave na concepção arquitetônica de edificações, tanto no quesito estético quanto no provimento de conforto térmico, acústico e visual (GUSTAVSEN *et al.*, 2007). Estes autores destacam a relevância das aberturas no desempenho energético de uma edificação, já que a transmitância térmica usualmente superior de janelas amplifica a troca de calor entre interior e exterior da edificação. Ao constatar uma lacuna de técnicas de baixo custo voltadas à melhoria da capacidade termoacústica, o presente estudo analisou a eficácia de janelas duplicadas em uma Câmara Bioclimática de Baixo Custo (CBBC), uma instalação dedicada a estudos comparativos de conforto ambiental e desempenho de edificações no Brasil.

Quanto ao isolamento termoacústico, Ahn *et al*. (2015) ressaltam que a substituição de esquadrias pode beneficiar a eficiência energética e o conforto termoacústico dos usuários em edificações antigas que passaram por *retrofit*, um processo de modernização que busca valorizar e prolongar a vida útil da construção, além de otimizar o conforto e a funcionalidade da edificação.

Ainda no que concerne à questão acústica, o crescimento urbano induz ao aumento da geração de ruídos, fator que dificulta o conforto acústico no interior de edifícios (CARVALHO, 2010). Neste sentido, o emprego de janelas de alta performance pode diminuir significativamente o impacto da poluição sonora (PARATI *et al.,* 2015).

A fim de aprimorar a eficiência energética de edifícios com soluções passivas, o aperfeiçoamento de elementos da envoltória vem sendo explorado por meio de alternativas de baixo custo. Neste contexto, Mankibi *et al*. (2015) experimentaram o uso de janelas duplicadas para melhorar as condições termoacústicas de edificações. Os autores concluíram que a instalação de janelas antepostas a esquadrias existentes pode ser uma solução eficiente e de baixo custo para imóveis com interesse de preservação, de modo a preservar as características externas da fachada de edificações consideradas patrimônio histórico. Analogamente, Oliveira (2007) propôs uma alternativa para melhorar o isolamento acústico de janelas de edificações existentes por meio da duplicação de janelas, sobrepondo uma nova janela à existente, mantendo uma camada de ar entre ambas. O autor constatou que a duplicação de janelas leva a um ganho de isolamento sonoro.

No quesito financeiro, esquadrias e vidros representam cerca de 8% do custo total de uma construção residencial de padrão médio/alto (SOUSA *et al*., 2017). Considerando o impacto das janelas no desempenho termoacústico de edificações, é pertinente analisar a relação custo-benefício destes elementos de vedação.

Em estudos previamente realizados na CBBC, constatou-se que a janela é o ponto frágil da envoltória, uma vez que a falta de vedação incorre em uma grande troca de calor com o meio externo (TREVISAN, 2019) e que a orientação da janela tem impacto na temperatura interna da câmara (KRÜGER *et al*., 2020). Neste contexto, a pesquisa em questão buscou contribuir ao aperfeiçoamento da estrutura da CBBC, além de estudar uma alternativa de baixo custo para aperfeiçoamento de janelas de edificações existentes, buscando enquadrá-las nas normas de desempenho vigentes no Brasil. Em contrapartida, a análise da estanqueidade da esquadria é objeto de reflexão quanto ao equilíbrio entre conforto ambiental e a importância da renovação do ar – especialmente após o estabelecimento da pandemia de COVID-19, que inclusive levou à interrupção dos ensaios desenvolvidos na CBBC, em março de 2020.

2. OBJETIVO

O presente trabalho buscou aperfeiçoar a capacidade termoacústica de uma Câmara Bioclimática de Baixo Custo instalada em Curitiba/PR, por meio da instalação de um sistema de janela duplicada e da subsequente análise das condições de conforto térmico, lumínico e acústico e de qualidade do ar.

3. MÉTODO

3.1 Caracterização da CBBC

Instalada em fevereiro de 2018 na Sede Ecoville da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, em Curitiba, a Câmara Bioclimática de Baixo Custo (CBBC) (Figura 1) foi concebida de modo a atender aos parâmetros da NBR 15.220/2005: Desempenho térmico das edificações, que define o Zoneamento Bioclimático Brasileiro e estratégias construtivas para otimizar o desempenho de edificações. De acordo com a NBR 15.220/2005, a cidade está situada na Zona Bioclimática 1 (ZB1) e o clima local enquadra-se como temperado marítimo úmido (Cfb), na classificação de Köppen-Geiger.

A CBBC é composta por um Módulo Controle (MC) e um Módulo Experimental (ME), independentes e rotacionáveis, cada um com 5,4m², possibilitando pesquisas comparativas e ensaios simultâneos sob a mesma condição climática. A facilidade de acesso e a praticidade de operação foram consideradas para a escolha desta área de implantação de 50m² (TREVISAN, 2019). A instalação da janela duplicada foi

realizada em novembro de 2018, apenas em ME (Figura 2), de modo a viabilizar análises comparativas com a estrutura original da CBBC, mantida em MC.



Figura 1 - Vista geral dos módulos da CBBC


Figura 2 - Instalação de janela duplicada no interior de ME

Na concepção original da CBBC, cada módulo tinha uma janela de 140cm de largura por 90cm de altura, com duas folhas, uma fixa e uma de correr, sem esquadrias, com vidro temperado incolor 6mm. Constatou-se que o fechamento da janela original era frágil e configurava uma ponte térmica, conforme indicado nos detalhes do interior da esquadria (Figura 3 A, B e C) e na imagem termográfica de ME (Figura 3 D). As fotos termográficas foram registradas em abril de 2018, portanto antes da instalação da janela duplicada em ME.

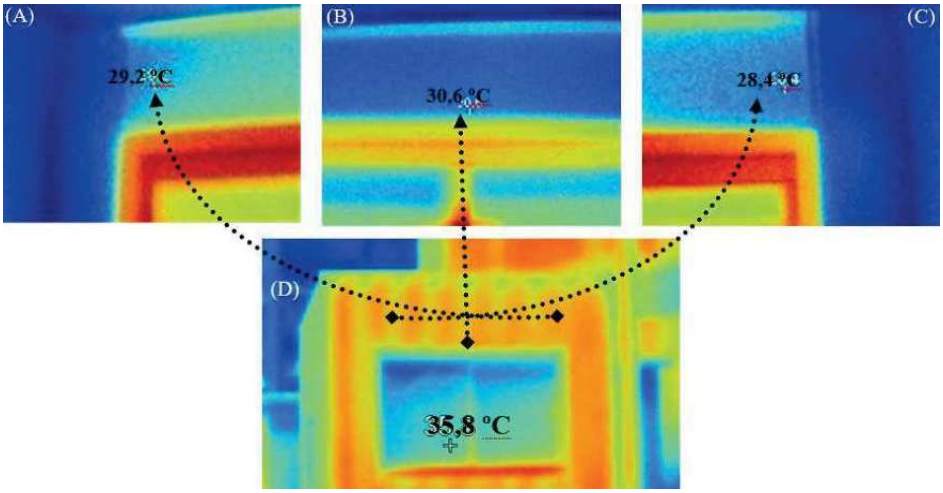


Figura 3 - Termografia da estrutura original de ME: (A) vista interna do canto superior esquerdo da janela; (B) vista interna do centro da janela; (C) vista interna do canto superior direito da janela; (D) vista geral externa da janela de ME (TREVISAN, 2019)

Para solucionar os problemas de vedação da envoltória e melhorar o desempenho termoacústico da CBBC, surgiu a hipótese da instalação de uma janela simples em sobreposição à existente. Mas por questões técnicas, janelas de vidro temperado devem ter pelo menos uma folha fixa. Assim, a instalação de outra janela similar sobreposta à existente resultaria em dificuldade de limpeza em uma das folhas. Neste contexto, a solução encontrada foi uma janela de dimensões equivalentes, com duas folhas tipo máximo ar, esquadria em alumínio branco, montantes preenchidos com isopor e vidro duplo laminado incolor composto por duas chapas de vidro 4mm intercaladas por lâmina de PVB (Polivinil Butiral) incolor. A esquadria duplicada foi instalada apenas em ME (Figura 1 B), para viabilizar a realização de estudos comparativos em relação a MC (CELLIGOI, 2020).

No que diz respeito à escolha do modelo da esquadria, o tipo máximo ar têm maior facilidade mecânica de vedação do que esquadrias de correr, visto que seu fechamento se dá por pressão de toda a folha contra o marco da esquadria (GUSTAVSEN *et al*., 2007). Em relação ao tipo de vidro, vidros laminados apresentam um ganho de isolamento acústico de cerca de 2dB(A) em relação aos vidros comuns e temperados de igual espessura, além da maior segurança contra estilhaços (SCHERER, 2005).

3.2 Monitoramento térmico

Para estabelecer uma relação entre a eficiência térmica da janela de vidro temperado e da janela duplicada, foram efetuadas medições simultâneas de temperatura interna em MC e ME. Inicialmente, realizou-se o monitoramento da temperatura em um período quente (de 09 a 15 de março de 2019). Quatro meses depois,

as medições foram repetidas em um período frio (de 05 a 12 de julho de 2019). No protocolo de medição, as janelas de ambos os módulos estavam fechadas e voltadas para o Norte verdadeiro, e a persiana, totalmente aberta. Foram realizados ensaios com e sem o uso de ar condicionado, tanto em MC quanto em ME.

O monitoramento da temperatura interna foi efetuado com sensores da marca Novus, mod. TagTemp Stick (precisão de ± 0,5 °C), instalados em um suporte central a 0,10m, 0,60m, 1,10m e 1,70m de altura, conforme preconizado pela norma ISO 7726/1998 para medições de temperatura ambiente com o ocupante sentado ou em pé. Cada sensor foi protegido da incidência solar direta por uma meia-cana de PVC revestida internamente com papel alumínio. Para medição da temperatura de globo, um 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).

O desempenho do ar condicionado, por sua vez, foi monitorado por um sexto sensor da marca Novus, mod. TagTemp Stick, instalado na aleta da unidade evaporadora. Adicionalmente, foi instalado junto ao disjuntor do ar condicionado um medidor eletrônico multifunção integrado da marca Landis+Gyr, mod. B1C3, aparelho com classe de exatidão B pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

A medição externa foi efetuada por uma estação meteorológica instalada sobre MC, em um tripé metálico fixado a 5,00m do solo (vide Figura 1). A estação é composta pelos seguintes medidores:

- um anemômetro da marca Onset, mod. S-WCA-M003 (precisão de ±0,5m/s)
- um termo-higrômetro da marca Onset, mod. HOBO S-THB-M002 (precisão de ±0,2ºC e ±2,5%)
- dois piranômetros da marca Onset, mod. HOBO S-LIB-M003 (precisão de ±10 W/m^2), sendo um em plano horizontal (medição da irradiação global) e outro em plano vertical orientado para o Norte verdadeiro.

3.3 Monitoramento lumínico

A iluminância dos módulos da CBBC foi monitorada em 29 de fevereiro e 01 de março de 2020, nove dias após o equinócio de outono, com MC e ME orientados com a janela voltada para o Norte verdadeiro, janelas fechadas e persianas abertas.

Foram utilizados luxímetros da marca Criffer, mod. Flex X-08 (faixa de medição entre 0,01 lux e 100.000 lux, espectro entre 380 nm e 780 nm). Cada sensor foi posicionado sobre o plano de trabalho do respectivo módulo, a um metro de distância da janela, com monitoramento da luminosidade a cada cinco minutos. Para evitar que algum resíduo eventualmente obstruísse a transmissão luminosa, os vidros das janelas foram previamente higienizados.

3.4 Monitoramento acústico

Em abril de 2018, antes de ser instalada a janela duplicada em ME, foram realizadas três medições acústicas preliminares em MC e ME, das 9h00 às 12h00, momento de ruído intenso, causado pelo tráfego veicular na região (ruído de fundo). Ambos os módulos da CBBC estavam com as respectivas fachadas da janela voltadas para o Norte verdadeiro, que coincide com a orientação para uma avenida de tráfego intenso.

Com a finalidade de verificar a influência da janela duplicada nas condições acústicas da CBBC, foram realizadas quatro novas medições acústicas em ME, com a fachada da janela voltada à Avenida, em 25 de abril de 2019, entre 16h30 e 17h00, horário próximo ao pico de tráfego vespertino.

Utilizou-se um analisador de frequência de classe 1, da marca Bruel & Kjaer, mod. B&K 2250-Light com microfone de ½" tipo campo aberto acoplado (faixa de medição dinâmica de 120dB(A), faixa de frequência de banda larga de 5Hz a 20kH, sensibilidade nominal de circuito aberto de 50mV/Pa ± 2dB(A)). Foram verificados os níveis de pressão sonora contínua equivalente, ponderados em A (LA_{eq}), integrados durante 5 minutos de medição, com o equipamento posicionado no centro de ME, a 1,50m de altura. Conforme preconizado pela NBR 10152/2020, utilizou-se a média logarítmica dos níveis de pressão sonora contínuos equivalentes, globais, ponderados em A, para determinar o LA_{eq} representativo de um ambiente.

Devido à indisponibilidade de equipamentos, inviabilizou-se o monitoramento simultâneo em MC e ME na medição realizada em 2019. Assim, para efeito de comparação, assumiram-se dados referenciais da medição acústica realizada em MC em abril de 2018.

3.5 Monitoramento de qualidade do ar

Para confirmar se o sistema duplo de janelas instalado em ME teria influência na taxa de renovação de ar, a concentração de dióxido de carbono (CO_2) foi monitorada no interior dos dois módulos, entre 14 e 15 de março de 2020. Monitorou-se a utilização de CO_2 como gás traçador, para obtenção da taxa de renovação de ar nos dois ambientes.

Para tal, medidores de CO_2 da marca Criffer, mod. Flex X-06 (faixa de medição entre 0 e 40.000 ppm) foram acomodados sobre o plano de trabalho do respectivo módulo, a um metro de distância da janela. Ambos os módulos da CBBC foram orientados com a janela voltada para o Norte verdadeiro, sendo que as janelas ficaram fechadas e as persianas permaneceram abertas.

As medições foram simultâneas em MC e ME e contaram com a participação de um ocupante no interior de cada ambiente, para produção de CO_2 por meio da respiração, até que se atingisse a concentração de 2.000 ppm em ambos os módulos. Após os ocupantes saírem simultaneamente de MC e ME, os dados continuaram a ser registrados até que se atingisse a concentração de 300 ppm CO_2, valor base verificado no espaço externo. A partir de então, a concentração de CO_2 no interior dos módulos fica mais suscetível às variações externas.

A taxa de renovação de ar foi obtida por meio do método do decaimento da concentração de um gás traçador (CO_2), conforme preconizado pela norma ASTM E 741/2006. Para tal, aplicou-se a Equação 1:

$$\bar{A} = [\ ln\ C(t_2) - ln\ C(t_1)\ ] / (t_2 - t_1) \qquad \text{Equação 1}$$

Em que:
$\bar{A}$ 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)

Ao apurar o decaimento da concentração de CO_2 considerou-se o início da análise como o momento em que os ocupantes saíram simultaneamente dos módulos. Como a saída dos participantes pressupôs a concentração mínima de 2.000 ppm CO_2, supõe-se que a concentração no momento inicial era diferente em MC e ME. Partindo desta hipótese, calculou-se uma concentração normalizada do CO_2 para cada módulo, de modo a possibilitar a comparação entre o decaimento do gás em MC e ME. Este método foi estabelecido por Roulet e Foradini (2002), e consiste na fórmula apresentada a seguir (Equação 2):

$$C_N = ln\ [\ (C_t - C_{ext}) / (C_i - C_{ext})\ ] \qquad \text{Equação 2}$$

Em que:
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)

4. RESULTADOS

4.1 Monitoramento térmico

O monitoramento de temperatura foi realizado em duas etapas, ambas com a janela voltada para o norte verdadeiro. A primeira etapa aconteceu em dias quentes, entre 9 e 15 de março de 2019. Durante os seis dias de coleta de dados, a máxima temperatura externa (27,7ºC) foi registrada em 15 de março de 2019, às 14h45.

Na Figura 4 consta a temperatura radiante média obtida por meio do procedimento estabelecido pela ISO 7726/1998. Percebe-se que ME manteve temperaturas mais baixas do que MC por todo o período. É possível notar também que a temperatura radiante média teve uma variação diária menor em ME, ou seja, a amplitude térmica em ME foi inferior que a registrada em MC. Este fato é um indicativo que o sistema de janela duplicada tem um desempenho melhor do que a janela simples, no que concerne ao ganho solar excessivo em dias quentes.

Ainda em períodos quentes e a fim de estudar possíveis vantagens da janela duplicada na redução do consumo energético em climatização artificial da CBBC, foi monitorada a variação de temperatura interna com o uso de ar condicionado. Durante o experimento, que teve a duração de 13 horas, a temperatura externa mais alta registrada foi de 27,7ºC. 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.

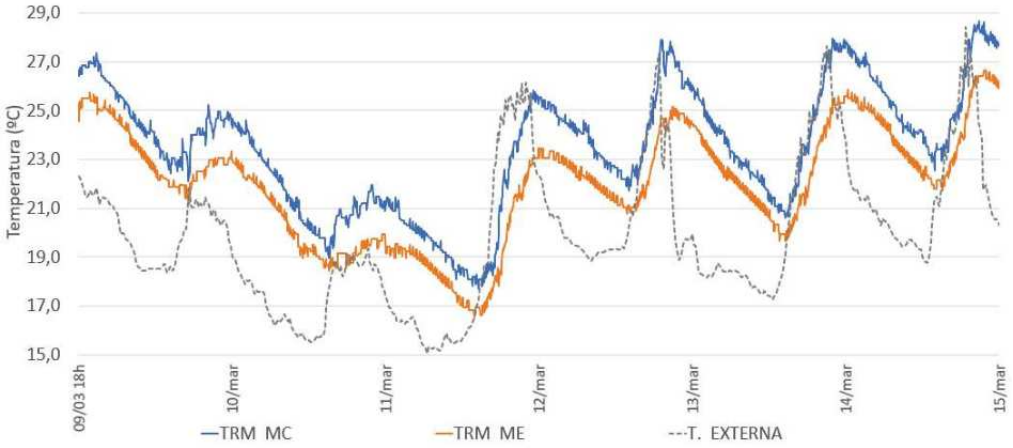


Figura 4 - Variação da temperatura radiante média em MC (azul) e ME (laranja), em dias quentes, sem uso de ar condicionado

A diferença entre a temperatura radiante média em MC e ME pode ser analisada na Figura 5. Percebe-se que ME atinge temperaturas mais baixas que MC, e que em menos de uma hora do início do experimento, a temperatura radiante média em ME atinge a temperatura de *setpoint* do ar condicionado (20°C), enquanto em MC a temperatura radiante média não atinge este patamar em momento algum do experimento. Esse fato aponta que ME pode ser resfriado com mais facilidade que MC em dias quentes, inclusive utilizando o ar condicionado, reforçando a hipótese que o sistema de janela duplicada possibilita um maior isolamento térmico da CBBC com o meio externo. Não obstante, cumpre salientar que a análise do consumo de energia nos dois módulos não indicou economia de energia em ME.

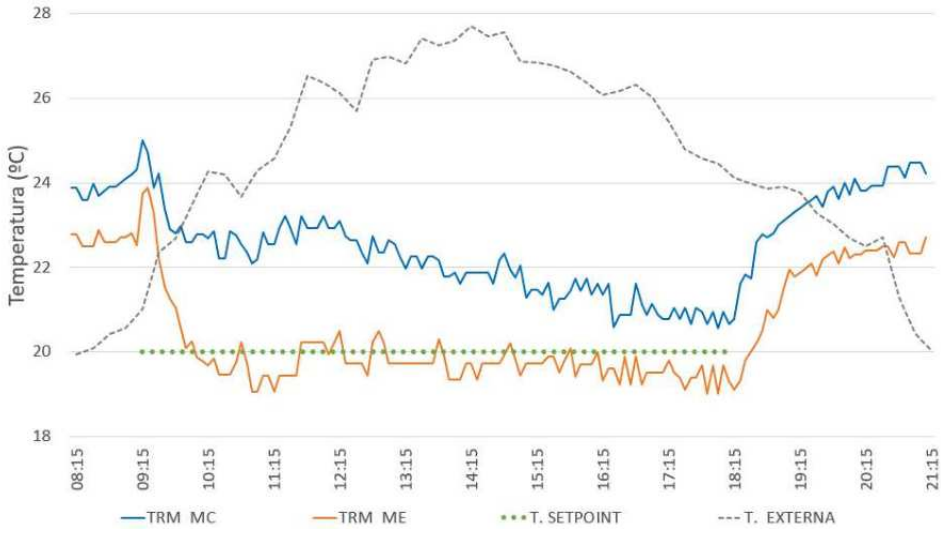


Figura 5 – Monitoramento da emperatura radiante média em MC (azul) e ME (laranja), em dias quentes, com uso de ar condicionado

A segunda etapa de monitoramento de dados de temperatura se deu no inverno e buscou comparar o comportamento térmico de MC (janela simples) e ME (janela duplicada), a fim de identificar possíveis contribuições do fechamento das aberturas para o desempenho térmico da CBBC em dias frios.

Ao contrário do que se esperava, identificou-se que MC teve temperaturas máximas mais elevadas do que ME, e que as temperaturas mínimas de ambos os módulos foram semelhantes e superiores às mínimas externas (Figura 6). É possível que a baixa transmitância térmica na janela duplicada, resultante das lâminas de vidro sobrepostas e do PVB, seja responsável pela reduzida taxa de aquecimento em ME, uma vez que no inverno o ganho solar é mais significativo visto que a altura solar mais baixa favorece a entrada de radiação solar direta no ambiente.

Em seguida, procedeu-se a análise do comportamento térmico da CBBC com o uso de ar condicionado para aquecimento em dias frios. O experimento teve a duração de 24 horas, com a temperatura externa variando entre 14,9ºC e 25,1ºC e a temperatura de *setpoint* da evaporadora configurada a 23ºC. Notou-se que, após o desligamento dos equipamentos de ar condicionado, MC apresentou uma queda de 2,7ºC no intervalo de 1h, enquanto ME teve queda de 1,1ºC 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.

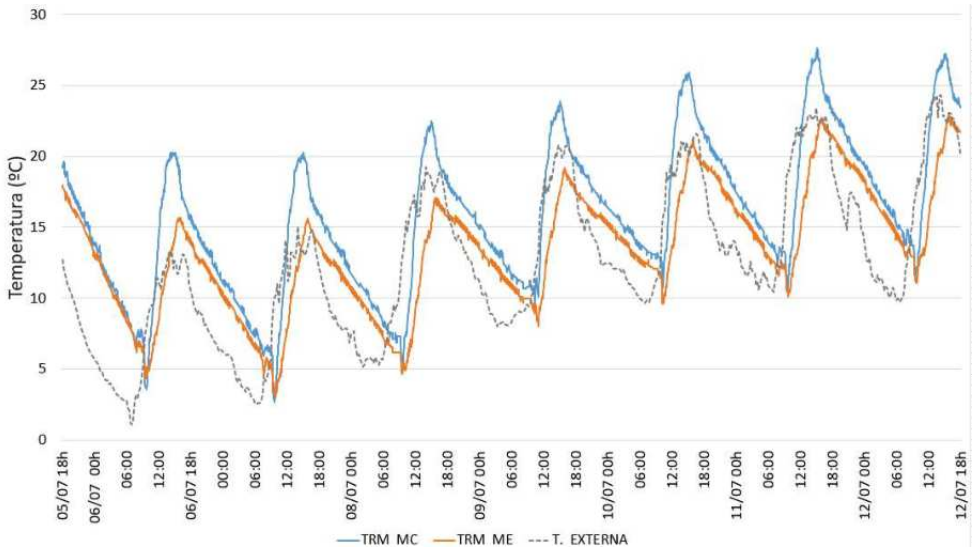


Figura 6 – Monitoramento da temperatura radiante média em MC (azul) e ME (laranja), em dias frios, sem uso de ar condicionado

4.2 Monitoramento lumínico

A iluminância no interior da CBBC foi monitorada a fim de verificar possíveis contribuições das diferentes camadas de vidro na iluminação natural do ambiente interno. O monitoramento foi realizado entre os dias 29 de fevereiro e 01 de março de 2020 e é ilustrado na Figura 7.

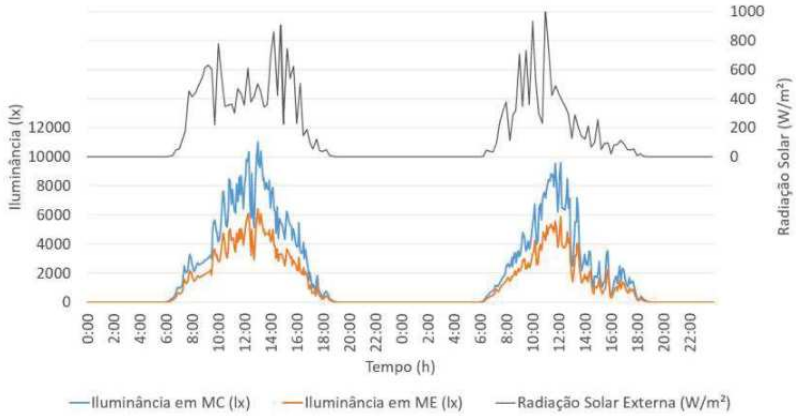


Figura 7 –Monitoramento da iluminância em MC (azul) e ME (laranja)

Conforme apresentado na Figura 7, registrou-se maior iluminância no interior de MC em comparação ao interior de ME, o que sugere que o sistema de janela duplicada diminuiu a luminosidade interna da CBBC. A menor iluminância em ME registrou mais tempo em condições de conforto lumínico, uma vez que diminuiu o período de condição de ofuscamento do usuário. Neste contexto, foram considerados e o parâmetro máximo de 2.000 lux instituído pelo critério de *Useful Daylight Illuminance* (UDI) desenvolvido por Nabil e Mardaljevic (2015), e o limite mínimo de 500 lux sobre o plano de trabalho em ambientes de escritório, estabelecido pelas normas NBR ISO/CIE 8995 (ABNT, 2013) e NHO 11 (FUNDACENTRO, 2018).

Cumpre destacar que o monitoramento de temperatura em dias frios sem ar condicionado mostrou que as temperaturas máximas foram maiores em MC do que em ME, contrariando as expectativas. Assim, o resultado obtido no monitoramento de dados de iluminação natural corrobora com a ideia de que a reduzida taxa de aquecimento de ME em dias frios é consequência da menor transmissão solar pelo sistema de janela duplicada.

4.3 Monitoramento acústico

Após a instalação da janela duplicada, registraram-se em ME níveis de pressão sonora mais baixos (em todas as frequências), do que aqueles previamente registrados na estrutura original de ME, em abril de 2018.

As curvas de avaliação de ruído representativo de um ambiente (L_{NC}) foram adotadas como parâmetro para avaliar a influência da janela duplicada nas condições de conforto acústico dentro dos módulos da CBBC. Antes da instalação do sistema duplicado, ME enquadrava-se nos parâmetros para centrais de telefonia (*call centers*), com níveis de pressão sonoros abaixo da curva NC45. 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), como pode ser observado na Figura 8.

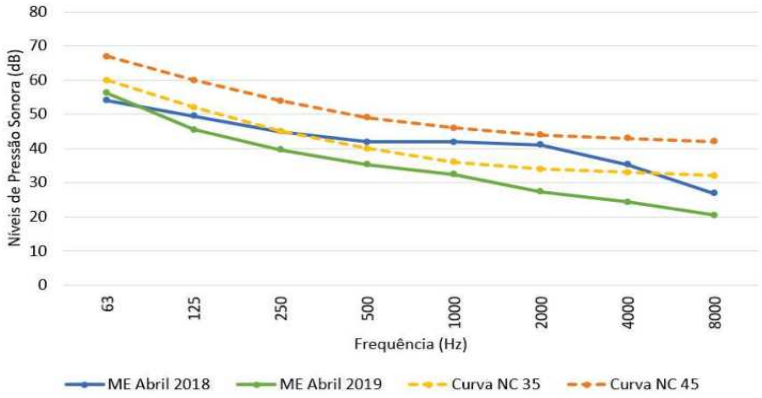


Figura 8 - Medições em ME com janela simples (abril de 2018) e duplicada (abril de 2019)

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

4.4 Monitoramento de qualidade do ar

O experimento demonstrou que a concentração de CO_2 dentro de ME aumentou mais rapidamente do que em MC e, após a saída dos ocupantes, atingiu estabilidade com o exterior em menos tempo. ME atingiu 2.000 ppm em 2h enquanto a concentração do gás em MC demorou 2h30 para atingir o mesmo valor (Figura 9). No momento em que os ocupantes saíram simultaneamente dos módulos, as concentrações de CO_2 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, tais valores foram considerados as concentrações do momento inicial da análise.

A taxa de renovação do ar na primeira hora do experimento, calculada com o método do decaimento definido na norma ASTM E 741/2006, foi de $0{,}33h^{-1}$ em MC e $0{,}18h^{-1}$ em ME. Da mesma forma, a vazão do ar em MC ($4{,}55m^3/h$) foi maior do que em ME ($2{,}5m^3/h$). Para estabelecer a concentração normalizada (C_N) de MC e ME e, assim, comparar o decaimento de CO_2 de MC e ME, foram utilizados os dados concentração de gás através do tempo (C_t) obtidos a cada 5 minutos pelos sensores. Analisando o decaimento do gás em MC e ME, observa-se maior intensidade no decaimento em MC (Figura 10).

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

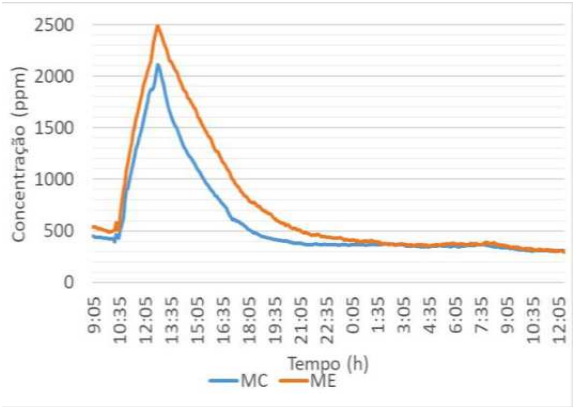


Figura 9 - Monitoramento da concentração de CO_2 (ppm) em MC (azul) e ME (laranja)

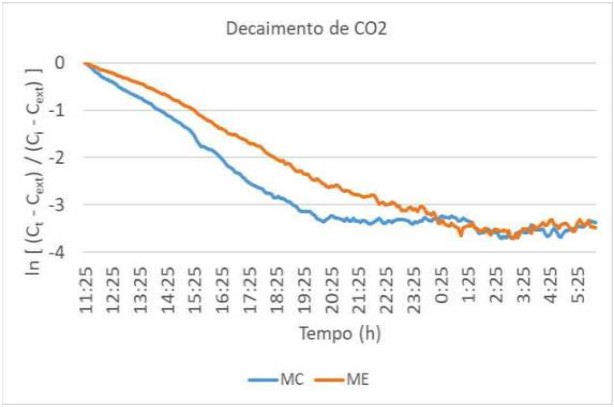


Figura 10 - Logaritmo de normalização da concentração de CO_2 em MC (azul) e ME (laranja)

5. CONCLUSÕES

Este trabalho incluiu experimentos comparativos sob influência de dois tipos de janela, compreendendo uma avaliação global e se destacando por analisar um grande número de variáveis que influenciam no conforto ambiental e na qualidade do ambiente interno. Identificou-se a influência de janela de vidro temperado e de janela duplicada na qualidade do ambiente interno da CBBC, comparando dados térmicos, lumínicos, acústicos e de renovação de ar de MC (janela simples, em vidro temperado, sem caixilhos) e ME (janela duplicada). Para facilitar a comparação entre as condições de conforto ambiental observadas em MC e ME, apresenta-se a Tabela 1 com uma síntese dos resultados obtidos neste estudo.

Tabela 1 - Síntese dos resultados obtidos nos ensaios de temperatura, iluminação, isolamento acústico e estanqueidade da esquadria

	Conforto térmico	**Conforto lumínico**	**Conforto acústico**	**Qualidade do ar**
Comparação de desempenho: ME vs MC	Menor ganho por diferença de temperatura (redução da transmitância térmica da janela), com consequente manutenção de temperaturas internas mais baixas no verão. Menor transmissão solar pela janela no inverno, com menor ganho solar e reduzida taxa de aquecimento do ambiente interno no inverno.	Redução das situações de ofuscamento	Redução do ruído interno devido ao maior isolamento acústico da janela	Aumento da estanqueidade com reduzida possibilidade de renovação de ar

Conforme indicado na Tabela 1, verificou-se que ME teve menor amplitude térmica do que MC, tornando a CBBC mais eficiente do ponto de vista do conforto ambiental, uma vez que a NBR 15220/2005 recomenda o uso de envoltória com grande isolamento térmico para edificações na Zona Bioclimática 1.

Em dias quentes, a janela duplicada foi responsável por manter temperaturas mais baixas no interior de ME e por acelerar o resfriamento do ambiente quando acionado o ar condicionado. Por outro lado, em dias frios, a melhor vedação do sistema duplicado não foi suficiente para garantir maiores temperaturas em ME, mas promoveu melhor aproveitamento do aquecimento mecânico.

O monitoramento de dados de iluminação natural no interior dos módulos indicou que as camadas de vidros deste conjunto tiveram impacto nos ganhos lumínicos, sugerindo também menores ganhos de calor em ME por radiação, o que pode justificar o pior desempenho térmico de ME em dias frios. A diminuição dos valores de iluminância em ME foi positiva do ponto de vista do conforto lumínico, uma vez que houve redução da intensidade e duração do ofuscamento no plano de trabalho onde a janela duplicada foi instalada.

No que concerne ao conforto acústico, a medição dos níveis de pressão sonora apontou menor intensidade de ruídos no interior de ME. Desta forma, concluiu-se que a janela duplicada favoreceu a eficiência do isolamento acústico da CBBC.

Em relação à estanqueidade da esquadria, ME registrou menos trocas de ar do que MC, como consequência da melhor vedação do sistema duplo. Isto pode influenciar negativamente na qualidade do ambiente interno, caso o ocupante permaneça por muito tempo dentro da CBBC sem abrir portas e janelas. Ademais, a pandemia da COVID-19 tem suscitado reflexões acerca da renovação de ar em ambientes internos. Embora a estanqueidade das janelas seja favorável à manutenção do conforto térmico e acústico, esta característica deve ser evitada em ambientes de uso coletivo sem a adequada renovação mecânica do ar. Neste sentido, cumpre salientar que a CBBC foi concebida para a utilização de um único usuário, portanto a contaminação entre pessoas pode ser mitigada com a higienização do ambiente e a troca de ar, sempre que um novo usuário ingressar no módulo.

Em conclusão, comprovou-se que a instalação de uma nova janela sobreposta à existente melhorou as condições de conforto termoacústico e lumínico no interior da CBBC, embora esta intervenção tenha apresentado um impacto negativo na taxa de renovação de ar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHN 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.

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

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

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

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

CELLIGOI, G. **Influência de janelas no conforto ambiental de uma Câmara Bioclimática de Baixo Custo.** Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Curitiba, 2020.

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

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

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.

KRÜGER, E. L.; TREVISAN, L. I.; TAMURA, C.; DI NÚBILA, C.; CELLIGOI, G.; BATISTA JUNIOR, S.; SILVA, D. L. da; TORRES FILHO, R. J. de A.; RIBEIRO, D. A. Efeito de orientação de janela nas condições térmicas do ambiente e na percepção do usuário. **Ambiente Construído**, v.20, n.4, p.79-98, Porto Alegre, 2020.

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.

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

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.

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

ROULET, C.-A.; FORADINI, F. Simple and cheap air change rate measurement using CO_2 concentration decays. **International Journal of Ventilation**, n.1, 2002.

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.

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.

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.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à UTFPR, pelo suporte ao desenvolvimento da pesquisa, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo auxílio financeiro.