XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído
JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

POTENCIAL DE MELHORIA DE DESEMPENHO TÉRMICO DE AMBIENTE RESIDENCIAL POR MEIO DA ADAPTAÇÃO SAZONAL DE ELEMENTOS DA JANELA EM CLIMA SUBTROPICAL ÚMIDO

Beatriz Arantes (1); Daniel Cóstola (2); Lucila C. Labaki (3)
(1) PhD, Arquiteta e Urbanista, Universidade Estadual de Campinas (Lacaf – Unicamp)
beatriz.arantes@live.com
(2) PhD, Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Faculdade Meridional (IMED);
Professor do Departamento de Engenharia Aeroespacial, University of Strathclyde,
daniel.costola@strath.ac.uk
(3) PhD, Professora do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas
(Lacaf – Unicamp), lucila@fec.unicamp.br

RESUMO
A adaptação de fachadas pode melhorar o desempenho térmico de um edifício por meio de sua modificação em resposta às variáveis de condições de contorno ambiental. Na composição das fachadas, as janelas são importantes elementos para as trocas de calor entre os meios internos e externos de um edifício, sendo sua configuração, muitas vezes, determinante para as condições térmicas internas. Tendo em vista a possibilidade de adaptabilidade sazonal de sistemas de janelas, estas podem compor as fachadas adaptáveis ao clima. Assim, o presente estudo visa o potencial de melhoria do desempenho térmico pela adaptação sazonal de elementos das janelas em ambiente residencial sob clima subtropical úmido. Sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) não são empregados. A pesquisa foi baseada em resultados de simulação de desempenho térmico de um quarto com adaptação sazonal da porcentagem de abertura da fachada (PAF) e *set-point* de fechamento da persiana, além do horário de ventilação natural do ambiente. O modelo adaptativo embasou os cálculos das horas de desconforto térmico no interior do modelo. Os resultados mostraram potencial de redução das horas de desconforto térmico pela adaptação sazonal do PAF e *set-point* de fechamento da persiana para as condições de ventilação adotadas.
Palavras-chave: simulação computacional, desempenho térmico, fachada sazonalmente adaptável.

ABSTRACT
Facade adaptation can improve the thermal performance of a building by modifying it in response to variable environmental boundary conditions. The windows are important elements for the heat exchanges between the internal and external environment of a building, being their configuration, often determinant for the internal thermal conditions. Given the possibility of seasonal adaptability of window systems, these can make up the climate-adaptable façades. Thus, the present study aims at the potential of thermal performance improvement by the seasonal adaptation of windows elements in a residential environment under humid subtropical climate. Heating, ventilation and air conditioning (HVAC) systems were not employed. The research was based on results of a thermal performance simulation of a room with seasonal adaptation of the facade opening percentage (PAF), blind closing set-point and ventilation schedule. The adaptive model based the calculations of thermal discomfort hours inside the model. The results showed potential of reducing the hours of thermal discomfort by the seasonal adaptation of the PAF and blind closing set-point for the ventilation conditions adopted.
Keywords: computer simulation, thermal performance, seasonally adaptive facade.

1. INTRODUÇÃO

As janelas são importantes elementos para as trocas de calor entres os meios internos e externos. As dimensões das áreas envidraçadas, seus valores de transmitância térmica e o uso de proteções internas ou externas podem influenciar nas condições térmicas do ambiente interno (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). A janela, através de sua superfície transparente (vidro) é capaz de permitir o ingresso da radiação solar no ambiente interno. A radiação solar pode ser benéfica, se bem aproveitada, ou indesejável em determinadas condições. (LABAKI; CARAM, 1995). Como elemento interferente nas condições térmicas do ambiente, o vidro está relacionado a ganhos térmicos nas edificações, sendo classificado como agente causador de desconforto térmico (TSIKALOUDAKI et al., 2012). Nos estudos de desempenho termoenergéticos das edificações, geralmente os vidros são avaliados em função de sua transmissividade e absortividade, propriedades com valores tabelados e variáveis de acordo com o tipo do vidro (LABAKI; CARAM, 1995). Visando a melhoria do desempenho termoenergético ambiental dos edifícios, variadas configurações de janelas são necessárias em prol do atendimento de particularidades de diferentes orientações solares e climas (ALBATICI; PASSERINI, 2011).

No Brasil, com o surgimento das edificações multifamiliares, persianas projetantes foram largamente aplicadas em fechamentos de dormitórios. Por se tratar de elementos articulados, sua angulação pode se dar de acordo com a incidência solar e permitir condição de ventilação permanente. Assim, as persianas projetantes se configuram como importantes elementos para o controle das condições térmicas ambientais. Após a década de 30 do século XX surge o sistema de abertura guilhotina com folhas contrapesadas. O mecanismo com cabos de aço faz com que bandeira e peitoril das janelas componham um sistema que resulta em painéis regulares ajustados com precisão. Ressalta-se a possibilidade de abertura total do vão e, aliado ao uso de venezianas permite ventilação constante. A partir da difusão de sistemas de climatização artificial e diante da despreocupação com o consumo energético, grande parte dos projetistas passou a negligenciar o conceito projetual de janelas e suas funcionalidades em relação ao desempenho térmico do edifício (SANTO; NICO-RODRIGUEZ; ALVAREZ, 2016).

Atualmente, as janelas compostas por folhas de correr são massivamente replicadas nas construções brasileiras. A possibilidade de abertura das "folhas" em diferentes proporções mostra o potencial de adaptabilidade do sistema, o que ocorre de acordo com as percepções de seu usuário. Acredita-se que o correto dimensionamento e adaptação das janelas, de acordo com o clima e a estação do ano, resultam em melhorias das condições térmicas internas das edificações. A adaptação das janelas ao clima e/ou estação do ano se relaciona diretamente a sistemas de fachadas sazonalmente adaptáveis. Tais sistemas são capazes de modificar uma ou mais propriedades em resposta às necessidades climáticas ou dos ocupantes do edifício (LOONEN et al., 2013). As fachadas sazonalmente adaptáveis podem ser totalmente modificáveis ou adaptar-se por meio da adoção sazonal de um dispositivo ou elemento, o que permite a identificação de, pelo menos, 100 tipos delas (LOONEN, 2010).

A adaptação das fachadas possui importante papel no cumprimento das ambiciosas metas de conservação de energia da União Europeia para 2020 e 2050 (AELENEI; AELENEI; VIEIRA, 2016; GOIA et al., 2014; JIN; FAVOINO; OVEREND, 2015; LOONEN et al., 2015, 2017). Assim, tendo em vista a importância das janelas no desempenho térmico ambiental, a falta de atenção dada a esses elementos por grande parte dos projetistas, a capacidade de adaptação de um sistema de janelas e a importância de sistemas de fachadas adaptáveis no desempenho termoenergético dos edifícios, o presente trabalho trata da influência da adaptação das janelas na melhoria do desempenho térmico de edifícios residenciais em clima subtropical úmido. São apresentados os desempenhos do modelo quando há possibilidade de adaptação sazonal da PAF e *set-point* de fechamento das persianas sob diferentes condições de ventilação.

2. OBJETIVO

Este artigo objetiva apresentar os resultados de pesquisa sobre o potencial de redução das horas de desconforto térmico pela adaptação sazonal do PAF e *set-point* de fechamento de persianas em edifícios residenciais situados em clima subtropical úmido, com diferentes condições de ventilação.

3. MÉTODO

A metodologia adotada para o desenvolvimento da pesquisa foi dividida nas seguintes fases: (i) definição do modelo a ser estudado; (ii) variação paramétrica; (iii) simulações de desempenho no *software* EnergyPlus V8.6 por meio de rotinas de automatização escritas no *software* MatLab R2014; (iv) análises dos resultados.

3.1. O modelo

Pesquisas sobre fachadas sazonalmente adaptáveis, no passado, muitas vezes basearam-se em modelos de simulação de energia de construção de zona única, já que esses modelos são ideais para explorar a relação entre as propriedades da fachada e o desempenho da construção. O modelo utilizado nesta pesquisa é uma zona térmica (3,00 x 2,60 x 2,70 m), com características representativas de quartos típicos encontrados em prédios residenciais brasileiros. A área opaca da fachada foi configurada conforme o sistema construtivo amplamente utilizado no Brasil: argamassa interna, bloco cerâmico, argamassa externa e pintura (U= 2.46 W/(m²K)) (INMETRO, 2013). Presume-se que a zona esteja situada em um andar intermediário e cercada por outras salas, portanto todas as superfícies são tratadas como adiabáticas, exceto a fachada principal. O desempenho do modelo foi obtido para quatro orientações principais da fachada: leste, oeste, norte e sul. Para fechamento da janela foi adotado vidro simples (*U-value*= 5,7 W/(m²K) e *g-value*= 0,86) (KASINALIS et al., 2014). Os padrões de uso são baseados na literatura (SILVA et al., 2014, 2016, SILVA; GHISI, 2013, 2014; SORGATO; MELO; LAMBERTS, 2016) e apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Padrão de uso

Parâmetro	**Intervalo**
Ocupação	2 pessoas
Horário de ocupação	Das 22:00 as 08:00horas (+1)
Taxa metabólica	81 W
Funcionamento iluminação	2 horas / dia
Ganhos por iluminação	5W/m2
Funcionamento equipamentos	2 horas / dia
Ganhos por equipamentos	55 W

O estudo apresentado não inclui nenhum sistema AVAC (sistema artificial de condicionamento ambiental) e a ventilação natural é usada para fins de refrigeração passiva. A ventilação natural foi definida como ventilação unilateral com a "*AirflowNetwork*" no EnergyPlus. Os coeficientes de pressão do vento foram calculados pelo programa usando a opção adequada "cálculo de superfície-média" para ambientes retangulares (MELO et al., 2008). O coeficiente de descarga de 0,6 foi adotado e a área total da janela é considerada como área de ventilação. O critério para habilitar a ventilação natural é apresentado abaixo:

$$T_{int} > T_{ext}$$
$$T_{int} > T_{set\text{-}point}$$
$$\text{Condição de operação} \neq 0$$

Equação 8

Onde:
T_{int}: temperatura interna [°C];
T_{ext}: temperatura externa de bulbo seco[°C];
$T_{set\text{-}point}$: *set-point* da temperatura para permitir a ventilação natural (primavera / verão $T_{set\text{-}point}$: 20 ° C; outono / inverno $T_{set\text{-}point}$: 26 ° C).

Devido à influência exercida pela ventilação no desempenho térmico e energético de um edifício, dois possíveis cenários de ventilação foram estudados: (i) ventilação noturna, a partir das 18h00 às 8:00 horas (+1) e (ii) ventilação diurna, das 8:00 às 22:00 horas, exemplificando o hábito brasileiro de permitir a ventilação natural durante o dia (SORGATO; MELO; LAMBERTS, 2016). Os intervalos de horas que permitem a ventilação natural foram baseados na exigência de ventilação natural para Porto Alegre - RS, durante o verão (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). O critério para permitir a ventilação natural garante as taxas de ventilação necessárias nas demais estações do ano.

3.1.1. Clima

O ambiente estudado foi avaliado sob condições climáticas de uma cidade do sul do Brasil (Porto Alegre - RS), usando dados meteorológicos fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil. (ENERGY, [s.d.]). De acordo com a classificação de Köppen-Geiger, Porto Alegre possui clima subtropical úmido (Cfa), tendo como característica grande variabilidade (ALVARES et al., 2013; PENTER et al., 2008). A cidade possui verões quentes (quando as temperaturas podem chegar a 35°C) e invernos bastante frios, com possibilidade de temperatura entre 0 e 5°C (UFRGS, 2018). Durante o inverno, a temperatura mínima

absoluta já registrada foi, aproximadamente, -0,2°C, enquanto no verão a temperatura máxima absoluta registrada foi, aproximadamente, 40,6°C. Em Porto Alegre a ventilação natural é necessária durante 23% das horas do ano, e 59% das horas de verão (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Nas estações de inverno e verão a cidade apresenta amplitudes térmicas mensais próximas a 10 °C. Durante o inverno as temperaturas máxima e mínima tendem a ser 10 °C inferiores àquelas registradas no verão. Nos meses de dezembro e janeiro, a radiação solar média na cidade é aproximadamente três vezes maior do que em junho e, aproximadamente, duas vezes maior que em julho e agosto. Diante da variabilidade do clima, torna favorável ao uso de fachadas sazonalmente adaptáveis na cidade de Porto Alegre (HAAG et al., 2018; INMET, 2018).

3.2. Variação paramétrica

A porcentagem de abertura da fachada (PAF) e o *set-point* de fechamento da persiana foram os parâmetros modificados automaticamente durante as simulações de desempenho. Diferentes combinações entre os parâmetros se deram aleatoriamente pelo Método de Monte Carlo. Na Tabela 2 são apresentados os possíveis intervalos de variação dos parâmetros.

Tabela 2 – Propriedades passíveis de variação

Parâmetro	**Intervalo**	**Unidade**
PAF	10 - 80	[%]
Set-point de fechamento das persianas	50 - 300	[W/m²]

3.3. Simulações de desempenho

A geometria do modelo estudado foi desenvolvida no SketchUp e importada para o Energy Plus V8.6 por meio do *plug-in* Legacy Open Studio. O processo de automatização das simulações se deu por rotinas escritas no MatLab R2014. Foram simuladas 500 diferentes combinações dos parâmetros para cada orientação solar e para cada possível condição de ventilação estudada. O desempenho térmico de uma amostra de 4.000 diferentes configurações de fachada embasou as análises apresentadas.

As simulações de desempenho realizadas para os doze meses do ano permitiram a identificação das configurações de fachadas mensais com menores condições de desconforto térmico que, combinadas, resultaram no desempenho anual das fachadas sazonalmente adaptáveis. As fachadas estáticas são aquelas que apresentam a mesma configuração durante todo o ano. Assim, a soma das horas mensais de desconforto térmico de cada uma das 4.000 configurações de fachada simuladas resultou no desempenho das fachadas estáticas. Dentre as diferentes condições de fachadas estáticas simuladas, para cada orientação solar e condição de ventilação, foi identificada a configuração de fachada com a qual o modelo apresentou o melhor desempenho térmico, sendo esta utilizada como parâmetro de comparação para quantificar o potencial de melhoria das condições térmicas pela adaptação sazonal dos elementos da janela.

3.4. Análise dos resultados

O número de horas de desconforto térmico foi calculado para o dia todo. O número de horas anuais de desconforto no interior do modelo indicou o desempenho dos casos investigados. Comparações dos desempenhos térmicos entre os casos adaptáveis simulados e o modelo de fachada estática suportaram as análises do potencial de redução de desconforto térmico de ambiente residencial em clima subtropical úmido.

O modelo de conforto adaptativo da ASHRAE "Condições ambientais térmicas para ocupação humana" (ASHRAE STANDARD 55-2013, 2013), embasou o cálculo das horas confortáveis. A análise considerou o conjunto de limites de temperatura operativa com os votos de aceitabilidade de 80%. Para este caso, as equações 2 e 3 permitem o cálculo dos limites superior e inferior da região confortável.

Intervalo de temperatura operativa (to) aceitável:

$$\text{Limite de aceitabilidade acima de 80\% (°C)} = 0{,}31\ \overline{t_{pma(ext)}} + 21{,}3 \qquad \text{Equação 9}$$

$$\text{Limite de aceitabilidade abaixo de 80\% (°C)} = 0{,}31\ \overline{t_{pma(ext)}} + 14{,}3 \qquad \text{Equação 10}$$

Onde:

to = Temperaturas operativas internas permitidas calculadas através da média da temperatura interna de bulbo seco e da temperatura radiante média da zona.

$\overline{t_{pma(ext)}}$ = Temperatura média externa, cujo cálculo é apresentado na norma.

4. RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos nesta pesquisa.

A Figura 1 ilustra o desempenho térmico do modelo dotado de fachadas estáticas, orientadas a leste, com diferentes taxas de PAF e *set-point* de fechamento da persiana. São apresentados os casos simulados sob as duas diferentes condições de ventilação consideradas. Os pontos que compõem a figura representam diferentes combinações dos parâmetros passíveis de variação, para cada condição de ventilação. A nuvem de pontos cinza demonstra o desempenho das diferentes configurações de fachada simuladas considerando o uso da ventilação noturna, enquanto a nuvem de pontos negros explana o desempenho de casos simulados com ventilação diurna.

De acordo com a figura, se aplicada a ventilação diurna, o modelo apresentou entre 1.598 e 2.238 horas de desconforto térmico por ano (equivalente entre 4,4 e 6,1 horas de desconforto por dia). O caso de melhor desempenho simulado contou com PAF= 40%, indicando a necessidade de grande área de ventilação para a retirada de parte do calor do ambiente e *set-point* de fechamento da persiana= 119 W/m², indicando a necessidade de bloqueio da incidência direta de raios solares no ambiente durante grande parte do dia. Quando a ventilação diurna foi aplicada, as horas de desconforto por calor prevaleceram em relação àquelas de desconforto por frio em todas as orientações solares.

Se aplicada a ventilação noturna o modelo apresentou entre 1.023 e 2.404 horas de desconforto térmico anual (entre 2,8 e 6,6 horas com condição de desconforto térmico por dia), e potencial de redução significativa das taxas de desconforto por calor. O caso de melhor desempenho simulado apresentou menor área efetiva de ventilação e maior permissividade de aquecimento do ambiente pela radiação solar difusa (PAF= 20% e *set-point* de fechamento da persiana= 166 W/m²), quando comparado a configuração de melhor desempenho com ventilação diurna. Tal resultado mostra a maior eficiência da ventilação noturna na manutenção de maiores índices de conforto térmico no interior do modelo. Estudos anteriores sugeriram que os efeitos positivos da ventilação noturna são alcançados quando a amplitude térmica no verão oscila entre 15-20 °C (GIVONI, 1991; GIVONI B, 1992), porém o ganho de desempenho é pronunciado neste estudo de caso, apesar das menores amplitudes térmicas (cerca de 10 °C no verão). Para todas as outras orientações solares estudadas (oeste, norte e sul), as fachadas estáticas aliadas ao uso da ventilação noturna também apresentaram desempenho melhorado em relação àquelas com ventilação diurna.

Assim, a figura explicitou a influência exercida pala variação dos parâmetros estudados nas horas de desconforto térmico no interior do modelo, quando a fachada é estática. Além da influência da configuração de elementos da janela no desempenho térmico, a eficácia da ventilação noturna para a redução das horas de desconforto térmico por calor no interior do ambiente ficou evidente. Os casos simulados considerando a adaptação sazonal dos elementos da janela terão potencial de aplicabilidade se apresentarem melhores condições térmicas quando comparados aos modelos simulados dotados de fachadas estáticas de melhor desempenho, para cada condição de ventilação analisada.

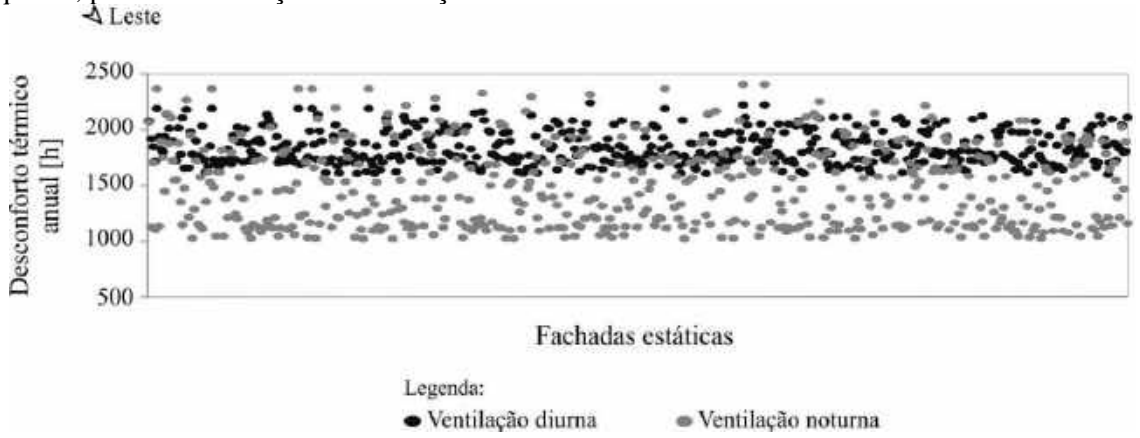


Figura 1 – Desempenho térmico do ambiente com diferentes configurações de fachadas estáticas.

A Figura 2 ilustra a influência da adaptação sazonal do PAF e do *set-point* de fechamento da persiana no desempenho térmico do ambiente para as orientações leste, oeste, norte e sul. De acordo com resultados obtidos nas simulações realizadas, a figura apresenta a comparação dos desempenhos das melhores fachadas estáticas (barras na cor cinza) e daquelas sazonalmente adaptáveis (barras azuis). São apresentados os resultados para as duas condições de ventilação estudadas.

Por meio da figura verificou-se que a adaptação sazonal dos elementos da janela (PAF e *set-point* de fechamento da persiana) combinada com a condição de ventilação diurna resultou em taxas entre 887 e 1.176 horas de desconforto térmico por ano (equivalente entre 2,4 e 3,2 horas de desconforto por dia). Quando

comparados aos desempenhos das fachadas estáticas, o uso de fachadas sazonalmente adaptáveis apresentou ganhos na ordem de 26%, 20%, 21%, e 25% para as orientações leste, oeste, norte e sul. A melhoria das condições térmicas ambientais se deu, principalmente, pela redução das horas de desconforto por calor. A redução das taxas de desconforto por calor ocorreu em maiores proporções nas orientações leste, oeste e norte, apresentando-se de maneira mais discreta na orientação sul.

Se utilizada a ventilação noturna, foi verificado potencial de redução das horas de desconforto térmico em taxas entre 37% e 53%. A adaptação de elementos da janela resultou entre 574 e 747 horas anuais de desconforto térmico (equivalente a taxas entre 1,6 e 2 horas de desconforto por dia). Quando utilizada a condição de ventilação noturna, a substituição de fachadas estáticas pelas adaptáveis resultou em ganhos aproximados de 27%, 24%, 19%, 25% para as orientações leste, oeste, norte e sul. Se comparados aos casos de ventilação diurna, as atenuações das horas de desconforto por calor são tão significativas que as pequenas elevações nas taxas de desconforto por frio pelo uso da ventilação noturna se tornaram insignificantes. Faz-se importante ressaltar que o clima estudado não apresenta temperaturas extremas e situações de desconforto térmico por frio podem ser contornadas pelo uso de roupas mais pesadas e/ou cobertores (nos locais de descanso, como o estudado). Já a redução das horas de desconforto por calor acarreta na diminuição da necessidade do uso de aparelhos de climatização artificial ambiental (consumidores de energia elétrica e, alguns, poluidores do ar).

A figura evidenciou a influência da ventilação adotada, também, no desempenho das fachadas sazonalmente adaptáveis. Embora as fachadas adaptáveis aliadas a ventilação noturna apresentem melhor desempenho em todas as orientações estudadas, é importante ressaltar que tal condição de ventilação tem seu uso inviabilizado, em alguns casos, por fatores como barulho e segurança, entre outros (KUBOTA; AHMAD, 2005). Quando comparados os desempenhos das fachadas estáticas àqueles das fachadas sazonalmente adaptáveis com a mesma condição de ventilação, a adaptação dos elementos da janela resultou em aumento das horas de conforto térmico no interior do modelo em todas as orientações solares analisadas. A orientação leste foi aquela que apresentou maior taxa de desconforto, quando a fachada é estática. Assim, as análises detalhadas sobre o desempenho da fachada sazonalmente adaptável orientada a leste são apresentadas nas Figuras 3 – 7.

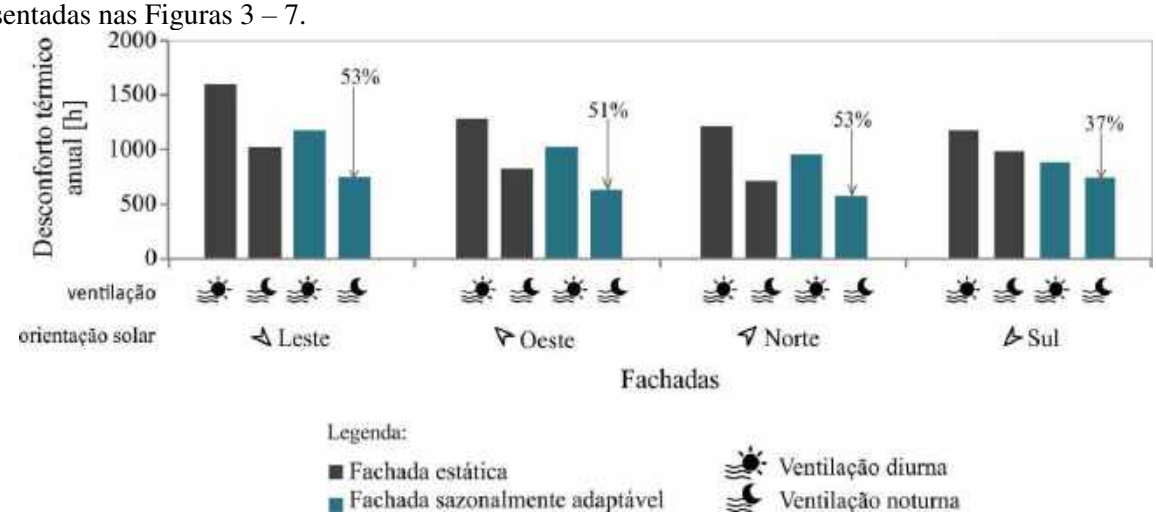


Figura 2 – Potencial de redução das horas de desconforto térmico por meio da adaptação sazonal de fachadas.

A Figura 3 ilustra o desempenho térmico do modelo dotado de fachadas sazonalmente adaptáveis em um mês frio e um mês quente, para a orientação leste. Na figura foram comparados os desempenhos do modelo quando adotadas as condições de ventilação diurna (linhas azuis escuras) e noturna (linhas azuis claras). Por meio da figura é possível analisar o comportamento das fachadas sazonalmente adaptáveis em diferentes estações do ano, de acordo com a condição de ventilação adotada.

De acordo com a figura, o desempenho do modelo é bastante similar quando aplicadas as ventilações diurna e noturna durante o mês de inverno. Do total de 744 horas que compõem o mês analisado (agosto), quando a ventilação diurna foi aplicada foram contabilizadas 117 horas (3,8 horas/dia) de desconforto térmico, das quais 110 foram por condição de frio. Já o uso da ventilação noturna resultou em 119 horas (3,8 horas/dia) de desconforto térmico, sendo 113 delas por frio. Assim, embora identificadas horas de condição de desconforto por frio, durante o mês de inverno há predomínio de condição de conforto térmico no interior do modelo. É importante ressaltar que para o mês em questão, independentemente da condição de ventilação adotada, o PAF e o *set-point* de fechamento da persiana identificados nos casos de melhor desempenho simulados foram os mesmos (Figura 5 (b)).

Durante o mês quente (dezembro) foi notável a diferença de desempenho do modelo de acordo com a condição de ventilação adotada. O mês de dezembro possui 744 horas, das quais 267 (8,6 horas/dia) acarretaram condição de desconforto térmico por calor quando a ventilação diurna foi aplicada. Nesse caso, não foi identificado desconforto por frio e durante 64% das horas que compõem o mês o ambiente apresentou-se termicamente confortável. Quando a ventilação noturna foi adotada, foram contabilizadas 150 horas (4,8 horas/dia) com condição de desconforto térmico no interior do cômodo. A adoção da ventilação noturna proporcionou, aproximadamente, 80% das horas mensais de conforto térmico no modelo e, conforme esperado para um mês quente, as horas de desconforto térmico por calor (133) prevaleceram sobre aquelas de desconforto por frio (17).

Assim, de acordo com a Figura 3, durante o mês frio analisado, se adotada a configuração de fachada de melhor comportamento simulada para o período, a diferença de desempenho identificada a partir da variação da condição de ventilação estudada foi insignificante. Já a fachada adaptável aliada à ventilação diurna se mostrou menos eficiente para a manutenção da condição de conforto térmico no interior do modelo, durante o mês de verão. O uso da fachada adaptável aliada à ventilação noturna reduziu significativamente as horas de desconforto por calor no interior do modelo, embora tenha criado algumas horas de desconforto por frio. Faz-se importante ressaltar que as fachadas de melhor desempenho identificadas para os meses ilustrados apresentam diferentes configurações, sendo estas apresentadas posteriormente nesse trabalho (Figura 5).

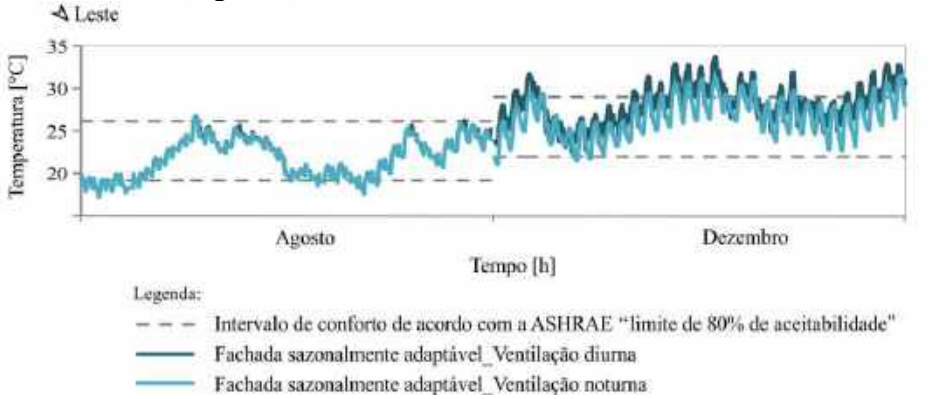
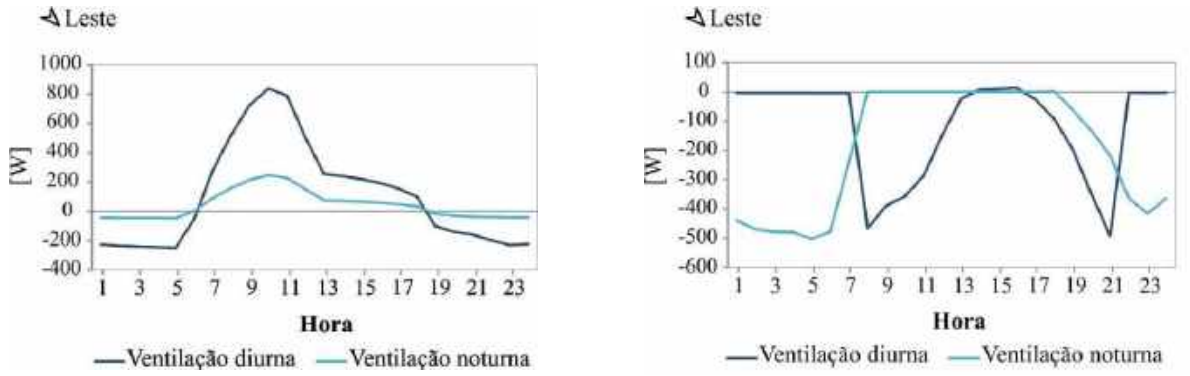


Figura 3 – Comportamento térmico mensal do modelo dotado de fachadas sazonalmente adaptáveis e diferentes condições de ventilação – orientação leste.

Tendo em vista a similaridade de desempenho do modelo com as diferentes condições de ventilação adotadas durante o frio, a Figura 4 ilustra o balanço térmico da janela para o mês quente e orientação leste. Foram explicitados os ganhos e perdas térmicas pela área envidraçada da janela (Figura 4 (a)) e ventilação (Figura 4 (b)), de acordo com a condição de ventilação aplicada. Os dados referentes à condição de ventilação diurna são representados pela cor azul escura, enquanto aqueles referentes à condição de ventilação noturna são representados pela cor azul clara, conforme a legenda da figura.

A Figura 4 (a) mostra os ganhos térmicos ambientais pela área envidraçada, para as diferentes condições de ventilação. Para ambas as condições de ventilação, conforme esperado na orientação leste (nascente), os ganhos térmicos são mais intensos no período da manhã devido à radiação solar direta e não deixam de existir, embora em menor intensidade, a tarde. Durante a noite, a perda de calor pela área envidraçada, devido às diferenças de temperaturas interna e externa, não é suficiente para dissipar os ganhos térmicos acumulados durante o dia, contribuindo para o acúmulo de calor no ambiente.

A Figura 4 (b) explicita as perdas térmicas pela ventilação. Nota-se que se aplicada a ventilação diurna, por conta das altas temperaturas externas ($T_{ext}>T_{int}$) a janela encontrou-se fechada durante grande parte do período vespertino. O fechamento das janelas durante parte do dia evita a entrada do ar quente externo no ambiente, mas contribui com acúmulo de calor oriundo da radiação solar difusa no interior do modelo. O período de ventilação do ambiente não foi suficiente para a remoção de todo o calor acumulado em seu interior. Como resultado do acúmulo de calor no ambiente tem-se a condição de desconforto térmico ambiental. Quando a ventilação noturna foi adotada, a diferença de temperaturas externa e interna ($T_{ext}<T_{int}$) permitiu a ocorrência de circulação de ar durante o todo o período noturno. A troca de ar do ambiente durante a noite resulta na retirada do ar quente e, consequente melhoria das condições térmicas ambientais.



(a) Área envidraçada (b) Ventilação

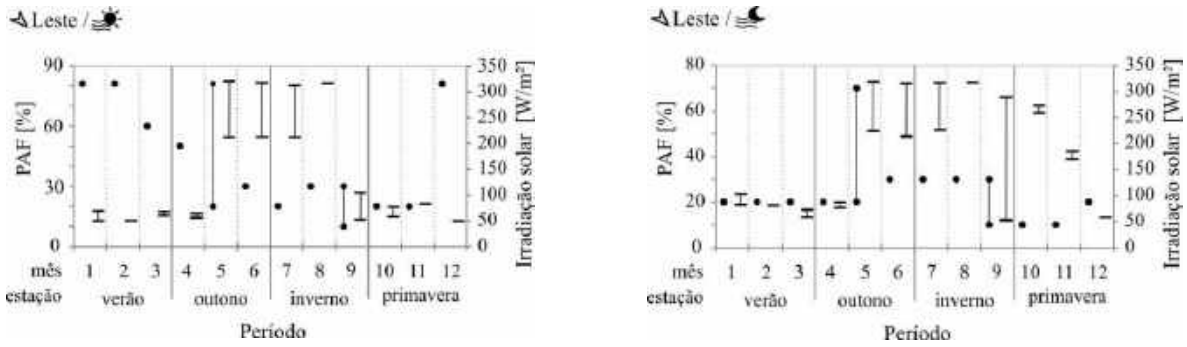
Figura 4 – Balanço térmico ambiental – orientação leste.

A Figura 5 ilustra, para as simulações de desempenho realizadas, as configurações do PAF e do *set-point* de fechamento da persiana que proporcionaram as melhores condições térmicas no interior do modelo quando os elementos são passíveis de adaptação. São apresentados os parâmetros mensais ideais. Enquanto a Figura 5 – Configurações de fachadas adaptáveis com diferentes condições de ventilação – orientação leste.(a) mostra os dados obtidos quando a ventilação diurna foi adotada, a Figura 5 – Configurações de fachadas adaptáveis com diferentes condições de ventilação – orientação leste.(b) mostra os resultados obtidos com o uso da ventilação noturna. Os dados são referentes a simulações realizadas para a orientação leste.

De acordo com a Figura 5(a), quando a condição de ventilação diurna foi adotada, durante meses com temperaturas mais quentes são necessárias maiores áreas de janelas. Devido às elevadas temperaturas externas e não possibilidade de abertura das janelas durante todo o período vespertino, maiores valores de PAF resultam em maiores áreas úteis de ventilação nos períodos em que a ventilação natural é permitida, contribuindo para a atenuação térmica ambiental de maior eficácia (possível). A figura mostra a necessidade de adaptação do PAF, seis vezes ao ano. Nos meses quentes, o *set-point* de fechamento das persianas deve ser baixo, o que inibe o aquecimento ambiental devido à radiação solar.

A Figura 5(b) ilustra os dados referentes aos modelos de melhor desempenho, quando a condição de ventilação noturna foi adotada. De acordo com a figura, durante os meses mais quentes são necessários menores valores de PAF e *set-point* de fechamento da persiana. Tal configuração ameniza o aquecimento ambiental decorrente da radiação solar e, combinada com os efeitos da ventilação noturna, resulta em condições térmicas ambientais mais favoráveis ao conforto humano. Durante os meses frios, maiores valores de PAF e *set-point* de fechamento da persiana contribuem para o aquecimento do ambiente pela radiação solar durante o dia. O calor acumulado durante o período diurno ajuda a compensar as perdas térmicas noturnas ocorridas pela área envidraçada devido à diferença entre as temperaturas interna e externa. Ressalta-se que nesse período, devido a condição de ocorrência da ventilação natural essa não se dá por toda a noite. Através da figura foi observada possibilidade de maior uniformidade da configuração da fachada nos diferentes meses do ano quando a ventilação é noturna.

Por meio da Figura 5 – Configurações de fachadas adaptáveis com diferentes condições de ventilação – orientação leste. foi observada, para a orientação leste, a necessidade de adaptação os elementos da janela (PAF e *set-point* de fechamento da persiana) com diferentes frequências, de acordo com a condição de ventilação adotada. Ainda de acordo com a condição de ventilação adotada, as configurações de fachadas mensais de melhor desempenho apresentam divergências, o que ocorre principalmente durante os meses mais quentes. Diante da figura também foi possível concluir que, além de proporcionar melhores condições térmicas ambientais, o uso da ventilação noturna requer menor frequência de adaptação da fachada para a manutenção do ambiente térmico mais agradável.



(a) Ventilação diurna (b) Ventilação noturna

Figura 5 – Configurações de fachadas adaptáveis com diferentes condições de ventilação – orientação leste.

5. CONCLUSÕES

As simulações computacionais realizadas visando a identificação do potencial de redução das horas de desconforto térmico por meio da adaptação sazonal do PAF e *set-point* de fechamento da persiana, em ambiente residencial e sob condições de clima subtropical úmido, permitiu as seguintes conclusões:

- as fachadas estáticas analisadas neste estudo não foram eficientes para a promoção de níveis aceitáveis de conforto térmico aos usuários do ambiente estudado;
- quando comparadas às soluções estáticas de melhor desempenho e mesma condição de ventilação, a adaptação sazonal de elementos da janela (PAF e *set-point* de fechamento da persiana) resultou em melhoria das condições térmicas do ambiente estudado nas orientações leste, oeste, norte e sul;
- a adaptação sazonal dos elementos da janela (PAF e do *set-point* da persiana) combinada ao uso da ventilação noturna resultou nas melhores condições térmicas no interior do modelo estudado para as orientações leste, oeste, norte e sul;
- visando a melhoria das condições térmicas ambientais, a adaptação dos elementos da janela (PAF e *set-point* de fechamento da persiana) mostrou maior eficácia durante os meses mais quentes do ano. A adaptação dos elementos mencionados resultou em significativa atenuação no número de horas com condição de desconforto térmico por calor;
- o desempenho do modelo dotado de fachadas sazonalmente adaptáveis está diretamente ligado à operação da mesma. Assim, a adaptação do PAF e do *set-point* de fechamento da persiana serão eficientes apenas se corretamente operadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AELENEI, D.; AELENEI, L.; VIEIRA, C. P. Adaptive Façade: concept, applications, research questions. **Energy Procedia**, v. 91, p. 269–275, 2016.

ALBATICI, R.; PASSERINI, F. Bioclimatic design of buildings considering heating requirements in Italian climatic conditions. A simplified approach. **Building and Environment**, v. 46, n. 8, p. 1624–1631, 2011.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ASHRAE STANDARD 55-2013. **Thermal Environmental Conditions for Human OccupancyAshrae**, 2013.

ENERGY, D. D. OF. **Weather Data by Location**. Disponível em: <https://energyplus.net/weather-location/south_america_wmo_region_3/BRA//BRA_PR_Foz.do.Iguacu-Cataratas.Intl.AP.869250_INMET>. Acesso em: 18 ago. 2017.

GIVONI, B. Performance and applicability of passive and low-energy cooling systems. **Energy and Buildings**, v. 17, n. 3, p. 177–199, 1991.

GIVONI B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. **Energy and Buildings**, v. 18, p. 11–23, 1992.

GOIA, F. et al. **Energy performance assessment of advanced integrated façades by means of synthetic metrics** (A. Li, Y. Zhu, Y. Li, Eds.)8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning. **Anais**...2014

HAAG, R. et al. **Banco de dados mensais da irradiação solar em diferentes municípios do Rio Grande do Sul**Porto Alegre:UERGS, , 2018. Disponível em: <https://atlassolarrs.com/>

INMET. **Dados históricos - Porto Alegre**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso em: 25 out. 2017.

INMETRO. **Portaria Inmetro no. 50/2013: Anexo Geral V – Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes, Coberturas e Vidros**. [s.l: s.n.].

JIN, Q.; FAVOINO, F.; OVEREND, M. **The potential opaque adaptive façades for office buildings in a temperate climate**Proceedings of Building Simulation 2015 Conference. **Anais**...Hyderabad, India: 2015

KASINALIS, C. et al. Framework for assessing the performance potential of seasonally adaptable facades using multi-objective optimization. **Energy and Buildings**, v. 79, p. 106–113, 2014.

KUBOTA, T.; AHMAD, S. **Questionnaire survey on behavior for natural ventilation and electricity consumption in Terraced Houses: A case study of Johor Bahru City**Asian Planning Schools Association (APSA) Conference 2005, Penang, Malaysia, 11-14 Sep. 2005. **Anais**...Peneng: 2005Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/237542511_Questionnaire_Survey_on_Behavior_for_Natural_Ventilation_and_Electricity_Consumption_in_Terraced_Houses_A_case_study_of_Johor_Bahru_City>
LABAKI, L. C.; CARAM, R. M. **Os vidros e o conforto ambiental**III Encontro nacional e I Encontro latino-americano de conforto no ambiente construído. **Anais**...Gramado, RS: 1995
LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3ª Edição ed. [s.l: s.n.].
LOONEN, R. C. G. M. **Overview of 100 Climate Climate Adaptive Building Shells**. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2010.
LOONEN, R. C. G. M. et al. Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 25, p. 483–493, 2013.
LOONEN, R. C. G. M. et al. Design for façade adaptability: towards a unified and systematic characterization. **Proceedings of the 10th Conference on Advanced Building Skins**, p. 1284–1294, 2015.
LOONEN, R. C. G. M. et al. Review of current status, requirements and opportunities for building performance simulation of adaptive facades. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 10, p. 205–223, 2017.
MELO, A. P. et al. **Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa EnergyPlus**. Florianópolis: [s.n.].
PENTER, C. et al. Inventário Rápido da Fauna de Mamíferos do Morro Santana, Porto Alegre, RS. **Revista Brasileira de Biociencias**, v. 6, n. 1, p. 117–125, 2008.
SANTO, A. D.; NICO-RODRIGUEZ, E.; ALVAREZ, C. E. **Janelas em edificações multifamiliares e o conforto térmico.** Entac 2016 - XVI Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. **Anais**...São Paulo: 2016
SILVA, A. S. et al. Knowing electricity end-uses to successfully promote energy efficiency in buildings: a case study in low-income houses in Southern Brazil. **International Journal of Sustainable Energy Planning and Management**, v. 2, n. 2012, p. 7–18, 2014.
SILVA, A. S. et al. Decision-making process for improving thermal and energy performance of residential buildings : A case study of constructive systems in Brazil. **Energy & Buildings**, v. 128, p. 270–286, 2016.
SILVA, A. S.; GHISI, E. Uncertainty analysis in building simulation: a case study in low-income dwellings in Brazil. **13th Conference of International Building Performance Simulation Association**, p. 1755–1762, 2013.
SILVA, A. S.; GHISI, E. Uncertainty analysis of user behavior and physical parameters in residential building performance simulation. **Energy and Buildings**, v. 76, p. 381–391, 2014.
SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption. **Energy and Buildings**, v. 133, p. 1–13, 2016.
TSIKALOUDAKI, K. et al. Assessing cooling energy performance of windows for residential buildings in the Mediterranean zone. **Energy Conversion and Management**, v. 64, p. 335–343, 2012.
UFRGS. **Porto Alegre**, 2018. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/relinter/portugues/menugeral/estudante-internacional/porto-alegre>. Acesso em: 30 out. 2018

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento da pesquisa.