APLICAÇÃO DO MÉTODO DO BALANÇO TÉRMICO POR CONVECÇÃO PARA A ANÁLISE DE DESEMPENHO TÉRMICO DE RESIDÊNCIAS VENTILADAS NATURALMENTE E HÍBRIDAS

Letícia Gabriela Eli (1); Tiago de Castro Quevedo (2); Ana Paula Melo (3); Roberto Lamberts (4)
(1) Mestra em Engenharia Civil, Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), leticia.gabriela.eli@gmail.com, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE/UFSC), Florianópolis–SC
(2) Mestre em Engenharia Civil, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), quevedotc@gmail.com, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE/UFSC), Florianópolis–SC
(3) Doutora, Professora do Departamento de Engenharia Civil, a.p.melo@ufsc.br, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE/UFSC), Florianópolis–SC
(4) PhD, Professor do Departamento de Engenharia Civil, roberto.lamberts@ufsc.br, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE/UFSC), Florianópolis–SC

RESUMO
O desempenho térmico de uma edificação é resultado da interação dos sistemas instalados, envoltória e clima externo, de maneira direta, essas interações podem ser analisadas através das trocas de calor que ocorrem nos ambientes. Nas edificações, a transferência de calor ocorre simultaneamente pela convecção, condução e radiação. O balanço térmico por convecção está relacionado ao ar do ambiente, sendo possível verificar as trocas de calor e o seu impacto na adição ou remoção de calor por meios passivos (ventilação natural) ou ativos (ar-condicionado). Dessa forma, este trabalho aplicou o método do balanço térmico por convecção para a analisar a influência do fator de abertura para ventilação (FV) de janelas nas trocas de calor da sala de uma edificação residencial ventilada naturalmente e híbrida, além de propor modificações a serem empregadas na envoltória a fim de aprimorar o desempenho térmico. Com os resultados foi possível verificar que a modificação no FV não altera significativamente as trocas de calor nos ambientes híbridos. O balanço térmico auxiliou na análise de desempenho térmico, sendo possível propor melhorias como a alteração da cobertura da edificação, a fim de reduzir os ganhos de calor nos meses mais quentes e a perda nos meses mais frios.

Palavras-chave: balanço térmico, convecção, desempenho térmico, ventilação natural, híbrido.

ABSTRACT
A building's thermal performance results from interacting with the internal sources, envelope, and external climate, and it can be analyzed through the heat exchanges in the environments. In buildings, heat transfer co-occurs by convection, conduction, and radiation. The thermal balance by convection is related to the indoor air, making it possible to verify the heat exchanges and their impact on adding or removing heat by passive means (natural ventilation) or active means (air conditioning). Thus, this work applied the convection thermal balance method to analyze the influence of the windows' opening factor for ventilation (FV) on heat exchanges in a residential building's living room operating with naturally ventilated and hybrid behavior. In addition, modifications are proposed to be used in the envelope to improve the thermal performance. With the results, it was possible to verify that the modification in the FV does not significantly changes the heat exchanges in the hybrid behavior. The thermal balance helped the thermal performance analysis, making it possible to propose improvements, such as changing the building's roof to reduce heat gains in the hottest months and losses in the coldest months.

Keywords: thermal balance, convection, thermal performance, natural ventilation, hybrid.

1. INTRODUÇÃO

O desempenho térmico de qualquer edificação é resultado das interações que ocorrem entre a envoltória, os sistemas instalados, os usuários e o meio externo (HENSEN; LAMBERTS, 2019). Quando é analisado o desempenho térmico de edificações residenciais, essas interações são ainda mais significativas, uma vez que cada pessoa possui sua própria rotina e hábitos, que influenciam diretamente no resultado obtido na análise e o que realmente ocorre no dia a dia. Em geral, a avaliação do desempenho térmico de um ambiente é realizada através da obtenção de indicadores que mensuram a maneira como o ambiente se comporta ao longo de um período, sendo importante que a escolha do indicador seja coerente com a análise requerida e a maneira como as edificações são operadas (ELI, L.G. et al., 2021; KRELLING et al., 2023). Por exemplo, caso a edificação seja condicionada artificialmente, é coerente analisá-la considerando o valor de carga térmica para refrigeração e aquecimento, entretanto, se a edificação for naturalmente ventilada não é recomendado este mesmo indicador.

A problemática relacionada à maneira como o desempenho térmico é mensurado ainda é pouco explorada, principalmente quando o foco são edificações naturalmente ventiladas ou híbridas. Dentre os estudos voltados à análise do desempenho térmico, há variação significativa sobre quais os indicadores utilizados para analisar o resultado da simulação computacional. Há pesquisadores que utilizaram como base a redução no consumo de energia voltado à refrigeração dos ambientes ou a redução na carga térmica de refrigeração (MIRRAHIMI *et al.*, 2016; PÉREZ-ANDREU *et al.*, 2021; SORGATO, M. J.; MELO; LAMBERTS, 2016; VETTORAZZI *et al.*, 2021), outros estudos utilizaram como indicador o graus hora de resfriamento (DABAIEH *et al.*, 2015; RODRIGUES *et al.*, 2019) ou ainda outros indicadores relacionados a índices específicos de normativas ou variáveis ambientais (SU; AYNSLEY, 2006; VÁZQUEZ-TORRES; GÓMEZ-AMADOR, 2022). Quando analisadas edificações naturalmente ventiladas, é comum também utilizar indicadores relacionados ao conforto térmico para mensurar o desempenho térmico (DABAIEH *et al.*, 2015; UZUM, M. dos S. D.; GONÇALVES, J. C. S., 2021; SORGATO, M. J.; MELO; LAMBERTS, 2016; VÁZQUEZ-TORRES; GÓMEZ-AMADOR, 2022). Por mais que o conforto esteja relacionado ao desempenho térmico é importante diferenciar as duas análises. O conforto térmico da edificação é relacionado à percepção do usuário com o ambiente no qual ele está inserido (BRAGER; DE DEAR, 1998; CÂNDIDO *et al.*, 2011; DE VECCHI *et al.*, 2015), enquanto o desempenho térmico é relacionado à edificação e seus componentes (ELI, L.G. et al., 2021; KRELLING et al., 2023).

Em uma edificação, as interações que ocorrem dentro de seus ambientes geram trocas de calor relacionadas à envoltória, às cargas internas (pessoas, iluminação e equipamentos), ao fluxo de ar por ventilação natural e ao uso de sistemas de climatização (SPITLER, 2019). Os ganhos e perdas de calor que ocorrem em um ambiente são responsáveis pelas variações de temperatura que ocorrem internamente, influenciando diretamente desempenho térmico da edificação. Na simulação computacional de desempenho termo energético de edificações pelo *software* EnergyPlus é possível analisar essas trocas de calor através do método do balanço térmico na superfície e no ar dos ambientes.

O balanço térmico na superfície é o resultado das três formas de transferência de calor que ocorrem simultaneamente nas edificações: condução, convecção e radiação. A condução ocorre exclusivamente por meios sólidos, como paredes, piso e cobertura. A convecção está relacionada aos fluídos e nas edificações é caracterizada principalmente pela troca de calor entre as superfícies e o ar. Há também a radiação que ocorre pela propagação de ondas eletromagnéticas entre os corpos (ELI *et al.*, 2021; LABEEE; ELI, 2021). O balanço térmico no ar é o resultado da interação das três formas de transferência do calor e é analisado considerando a convecção. A análise pela convecção tem relação direta com a temperatura do ar do ambiente e, consequentemente, com o consumo de sistemas de climatização, como o ar-condicionado. Dessa forma, pode auxiliar na análise das trocas de calor frente a variações construtivas, comportamentais, dentre outras, ou ainda na definição de novas estratégias a serem empregadas a fim de aprimorar o desempenho térmico da edificação.

Dessa forma, é fundamental o desenvolvimento de trabalhos que explorem a aplicação do balanço térmico como uma ferramenta de análise do desempenho térmico e energético de edificações. Neste trabalho, o método do balanço térmico no ar é aplicado na análise das trocas de calor de uma edificação residencial frente a variações no fator de abertura para ventilação, considerando a climatização naturalmente ventilada e híbrida.

2. OBJETIVO

Apresentar o balanço térmico no ar interno como um método de análise das trocas de calor em edificações e uma ferramenta para a definição de estratégias a serem empregadas na envoltória, a fim de aprimorar o desempenho térmico.

3. MÉTODO

Para o desenvolvimento deste estudo, foram inicialmente definidos e simulados cinco casos variando o fator de abertura para ventilação das janelas dos ambientes de permanência prolongada (APP) da residência. Para cada caso foram analisados o calor retirado ou adicionado ao ar do ambiente por ventilação natural e sistemas de climatização. Ainda, foram avaliadas as trocas de calor por convecção, que ocorrem entre as superfícies e o ar, e as cargas internas e o ar. Por fim, foram analisados os indicadores de desempenho térmico segundo a NBR 15575-1:2021 (ABNT, 2021), a fim de analisar a correlação entre as trocas de calor dos ambientes e o desempenho térmico final da unidade habitacional.

Para o desenvolvimento deste trabalho foi adotada a versão 22.2 do *software* EnergyPlus (DOE, 2022).

3.1. Tipologia e variações no fator de abertura das janelas

Foi adotada uma residência unifamiliar térrea de 43,2 m², com dois dormitórios e uma sala com cozinha conjugada, representativa da baixa renda brasileira (TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2015). Na Figura 1 é possível visualizar a planta-baixa da residência, a área útil de cada ambiente de permanência prolongada (APP) e a área de vidro e orientação de cada janela. A área de elemento transparente das janelas está de acordo com a edificação de referência da NBR 155575-1:2021 (ABNT, 2021), ou seja, representa 17% da área de piso.

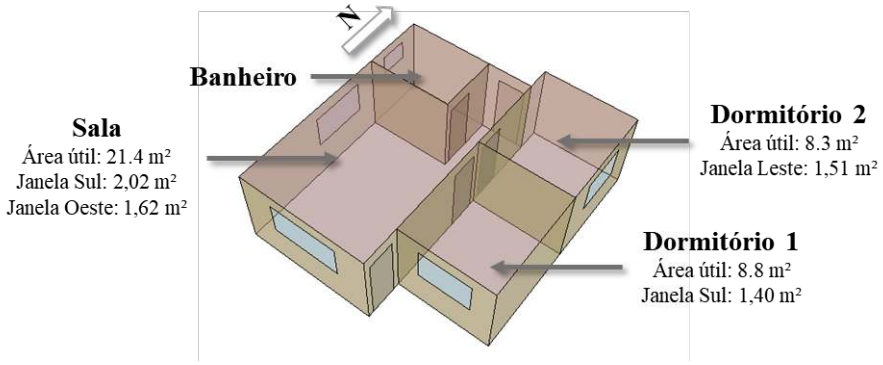


Figura 1 - Tipologia adotada, adaptada de Triana, Lamberts e Sassi (2015).

Assim como a área de elemento transparente, as demais características construtivas da edificação foram adotadas conforme edificação de referência da NBR 15575-1:2021 para as zonas bioclimáticas brasileiras de 1 a 7, as propriedades térmicas podem ser visualizadas na Tabela 1. Para os elementos transparentes, foi adotado um elemento com fator solar (FS) de 0,87 e transmitância térmica (U_t) de 5,70 W/(m².K) e foram consideradas as esquadrias. A emissividade de onda longa adotada foi igual a 0,90 para todas as superfícies e nos casos que a absortância à radiação solar não era especificada na normativa, foi adotado o valor médio de 0,50.

Tabela 1 - Características térmicas da envoltória.

Elemento Construtivo	Descrição	Condutividade térmica	Calor específico	Densidade	Absortância à radiação solar
Paredes externas	Elemento de vedação de 100 mm	1,75 W/(m.K)	1000 J/(kg.K)	2200 kg/m³	0,58
Paredes internas					0,50
Pisos					
Cobertura	Telha de 6 mm (camada externa)	0,65 W/(m.K)	840 J/(kg.K)	1700 kg/m³	0,65
	Câmara de ar com resistência térmica de 0,21 (m².K)/W				
	Laje de 100 mm (camada interna)	1,75 W/(m.K)	1000 J/(kg.K)	2200 kg/m³	0,50

A área de ventilação determinada para o caso de referência da NBR 15575-1:2021 deve ser igual a 7,65% da área de piso do APP, resultando em um fator de abertura para ventilação (FV) de 0,45 ou 45% da área de elemento transparente de cada abertura. Neste estudo foi simulada a residência variando o valor do FV

em 1%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%. É importante mencionar que as janelas são do tipo de correr (abrem na horizontal) e possuem infiltração por frestas, conforme valores da NBR 15575-1:2021.

As cargas internas foram consideradas conforme o procedimento de simulação computacional da NBR 15575-1:2021, ou seja, há a presença de duas pessoas na sala durante 14h00 e 17h59 e de quatro pessoas das 18h00 até 21h59, os dormitórios são ocupados por duas pessoas durante o período das 22h00 até 07h59. A iluminação foi considerada a densidade de potência de 5 W/m² acionada entre 16h00 até 21h59 na sala e nos dormitórios entre 22h00 até 23h59 e entre 6h00 até 07h59. Equipamentos são considerados somente na sala, ligados durante todo o período de ocupação com potência igual a 120 W.

3.2. Clima

Para o estudo foi considerado o clima de São Paulo (SP), caracterizado como zona bioclimática 3 pela NBR 15220-3 (ABNT, 2005). Embora a NBR 15575-1:2021 apresente uma base de dados de arquivos climáticos e que devem ser utilizados para a análise de desempenho térmico (ABNT, 2021a), neste trabalho foi adotado o arquivo "BRA_SP_Sao.Paulo-Congonhas.AP.837800_TMYx.2007-2021" (CRAWLEY; LAWRIE, 2023). A temperatura média de bulbo seco (TBS_m) para São Paulo, considerando esse arquivo climático, é de 20,37 ºC, ligeiramente superior à TBS_m de 20,15 ºC do arquivo climático presente na base de dados da norma (ABNT, 2021; KRELLING et al., 2023).

3.3. Variações no comportamento dos usuários

Foram consideradas duas variações no comportamento dos usuários, sendo com ventilação natural, conforme determinação da NBR 15575-1:2021 (ABNT, 2021) e o comportamento híbrido. Para o comportamento do usuário com Ventilação Natural (VN), a abertura das janelas ocorre quando os ambientes de permanência prolongada estão ocupados, a temperatura externa é igual ou superior a 19 ºC e menor do que a temperatura do ar interno. As portas internas entre dormitório e sala permanecem abertas durante todo o período. No comportamento Híbrido (H), se ao iniciar a ocupação no APP a temperatura operativa no APP for menor do que 26 ºC e maior do que 18 ºC e os critérios para abertura das janelas do comportamento VN forem satisfeitos, há a abertura das janelas para ventilação. A partir do momento que a temperatura operativa é superior ou igual a 26 ºC, há o acionamento do cálculo da carga térmica de refrigeração, reduzindo e mantendo a temperatura do ar em 23 ºC até a ocupação ser finalizada. Caso a temperatura operativa seja inferior ou igual a 18 ºC, há o acionamento do cálculo da carga térmica de aquecimento, aumentando a temperatura do ar do APP para 21 ºC até a ocupação ser finalizada. Os valores de 23 ºC e 21 ºC para o cálculo da carga térmica estão de acordo com a NBR 15575-1:2021. O comportamento híbrido tem como base o estudo de Eli et al. (2021).

Aplicando as duas variações de comportamento é possível analisar como as trocas de calor são influenciadas pela maneira que a edificação é climatizada, considerando a ventilação natural, que é ainda o tipo de uso mais recorrente no Brasil (SORGATO, M.J.; MELO; LAMBERTS, 2016), mas que vem sendo substituído por sistemas de ar-condicionado (ELI, L.G. et al., 2021; KRELLING et al., 2023; RAMOS et al., 2020).

3.4. Balanço térmico no ar do ambiente

A análise do balanço térmico no ar nos permite avaliar qual a fonte do ganho ou perda de calor no ambiente que irá aumentar ou reduzir as temperaturas internas e, consequentemente, definir a necessidade de climatização artificial. Essa análise é regida pela convecção que ocorre entre as superfícies, os ganhos internos (pessoas, iluminação e equipamentos) e o ar do ambiente, a fim de alcançar o equilíbrio térmico entre todas as partes. Dessa forma, o somatório de todos os ganhos e perdas que ocorrem no ambiente deve ser igual a zero ou próximo a zero. A Equação 1 abaixo descreve o equilíbrio térmico para um determinado período de tempo, as variáveis são explicadas na Tabela 2.

$$\sum q"_s + q"_{s,glass} + (q"_{IL} + q"_{inf,gain,out} + q"_{inf,loss,out} + q"_{inf,gain,int} + q"_{inf,loss,int} + q"_{syst,cool} + q"_{syst,heat}) = 0 \quad \text{Equação 1}$$

Tabela 2 – Dados de saída programa EnergyPlus para o balanço térmico por convecção.

Troca de calor	Dado de saída do EnergyPlus	Descrição da troca de calor
$q"_s$ Envoltória	Surface Inside Face Convection Heat Gain Rate[1] [W]	(positivo ou negativo) É obtido para cada superfície (opaca ou translúcida). Se negativo, indica que o calor é transferido da superfície para o ar do ambiente, isso após a multiplicação por -1 para ser utilizado na Equação 1.

$q''_{s,glass}$ Envoltória	Surface Window Inside Face Frame and Divider Zone Heat Gain Rate [W]	(positivo ou negativo) É obtido para cada janela. Se negativo, indica que o calor é transferido do ar para a superfície.
q''_{IL} Ganhos Internos	Zone Total Internal Convective Heating Rate [W]	(positivo) É obtido para cada zona térmica. Indica a quantidade de calor adicionada ao ar interno pelos sistemas (por ex. iluminação) e pessoas presentes no ambiente
$q''_{inf,gain,out}$ Ganho Ar. Ext.	AFN Zone Ventilation Sensible Heat Gain Rate [W]	(positivo) É obtido para cada zona térmica. É referente ao calor adicionado ao ar do ambiente pelo ar externo a residência (por ex. advindo das janelas e portas externas).
$q_{inf,loss,out}$ Perda Ar. Ext.	AFN Zone Ventilation Sensible Heat Loss Rate[1] [W]	(negativo) É obtido para cada zona térmica. É referente ao calor retirado ao ar do ambiente pelo ar externo a residência (por ex. advindo das janelas e portas externas). É negativo após a multiplicação por -1.
$q''_{inf,gain,int}$ Ganho Ar Int.	AFN Zone Mixing Sensible Heat Gain Rate [W]	(positivo) É obtido para cada zona térmica. É referente ao calor adicionado ao ar do ambiente pela ventilação entre zonas térmicas adjacentes.
$q''_{inf,loss,int}$ Perda Ar Int.	AFN Zone Mixing Sensible Heat Loss Rate[1] [W]	(negativo) É obtido para cada zona térmica. É referente ao calor removido ao ar do ambiente pela ventilação entre zonas térmicas adjacentes. É negativo após a multiplicação por -1.
$q''_{syst,heat}$ Aquecimento	Zone Air System Sensible Heating Rate [W]	(positivo) É obtido para cada zona térmica. É referente ao calor adicionado do ar do ambiente por sistemas mecânicos (por ex. ar condicionado). É negativo após a multiplicação por -1.
$q''_{syst,cool}$ Refrigeração	Zone Air System Sensible Cooling Rate[1] [W]	(negativo) É obtido para cada zona térmica. É referente ao calor removido do ar do ambiente por sistemas mecânicos (por ex. ar condicionado). É negativo após a multiplicação por -1.
[1]Na Equação 1, é necessário multiplicar o valor obtido por -1.		

Para a análise do balanço térmico, os resultados foram obtidos para o somatório das trocas mensais. Dessa maneira é possível verificar as variações ao longo dos meses mais frios e mais quentes do ano.

3.4. Indicadores de desempenho térmico

A fim de verificar se é possível a correlação entre as trocas de calor por convecção e o desempenho térmico da residência. Para verificar o potencial da ventilação natural em manter temperaturas operativas satisfatórias dentro dos ambientes, foi utilizado o indicador de desempenho térmico percentual de horas ocupadas dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT), presente na NBR 15575-1:2021 (ABNT, 2021; KRELLING et al., 2023). Para o cálculo do PHFT foi considerada a faixa de temperatura operativa entre 18 ºC e 26 ºC, uma vez que a TBS_m é menor que 25 ºC para o arquivo climático de São Paulo adotado.

Para o usuário Híbrido, foi analisado o PHFT das horas sem o acionamento da carga térmica, além da carga térmica sensível de refrigeração e aquecimento, obtida através do balanço térmico no ar.

4. RESULTADOS

Foram avaliados os resultados para a sala, uma vez que apresenta a maior carga térmica, área e maior quantidade de superfícies, auxiliando no entendimento e visualização do balanço térmico. Para a análise do balanço térmico, é importante inicialmente avaliar qual é a principal fonte de ganho e perda de calor. Por exemplo, em alguns casos as cargas internas são responsáveis por emitir maior quantidade de calor para o ar do ambiente do que o envelope, dessa forma, a envoltória pode auxiliar na melhoria do desempenho térmico da edificação removendo calor, juntamente com a ventilação natural. Na Tabela 3 são apresentados os valores de PHFT para a sala e em todos os casos simulados.

Tabela 3 – Resultado PHFT para cada um dos casos simulados.

Comportamento de usuário	**FV: 1%**	**FV: 20%**	**FV: 40%**	**FV: 60%**	**FV: 80%**	**FV: 100%**
Ventilação Natural	35,7%	48,2%	53,8%	57,0%	59,3%	60,9%
Híbrido	31,0%	35,9%	38,9%	39,5%	39,8%	40,2%

Na Figura 2 são apresentados os resultados para o ganho de calor total por mês para os Ganhos Internos, o somatório das trocas de calor pela Envoltória, os ganhos e perdas pela ventilação natural advinda

do meio externo (Ganho/Perda Ar Ext.) e zonas internas (Ganho/Perda Ar Int.) e a carga térmica de Refrigeração e Aquecimento, calculada pelo *Ideal Loads.*

Os resultados da Figura 2 mostram que há maior impacto nas trocas de calor pela modificação na área de ventilação do ambiente para o comportamento de usuário Ventilação Natural (VN). Para o comportamento de usuário Híbrido, as trocas permanecem similares principalmente nos meses mais quentes, onde a refrigeração remove a maior parte do calor do ambiente e a abertura das janelas ocorre em períodos mais curtos. Correlacionando com o valor de PHFT para esses casos, é possível notar que não há uma melhora significativa no indicador ao alterar o fator de abertura para ventilação, por exemplo, para o FV 1% o PHFT foi 31,0% e para o FV 100% foi 40,2%, valores próximos considerando que a área de abertura para ventilação passou de 0,04 m² para 3,64 m². Isto indica que a modificação na área de ventilação teve baixa influência na redução das temperaturas operativas da sala no início da ocupação, necessitando do acionamento da carga térmica.

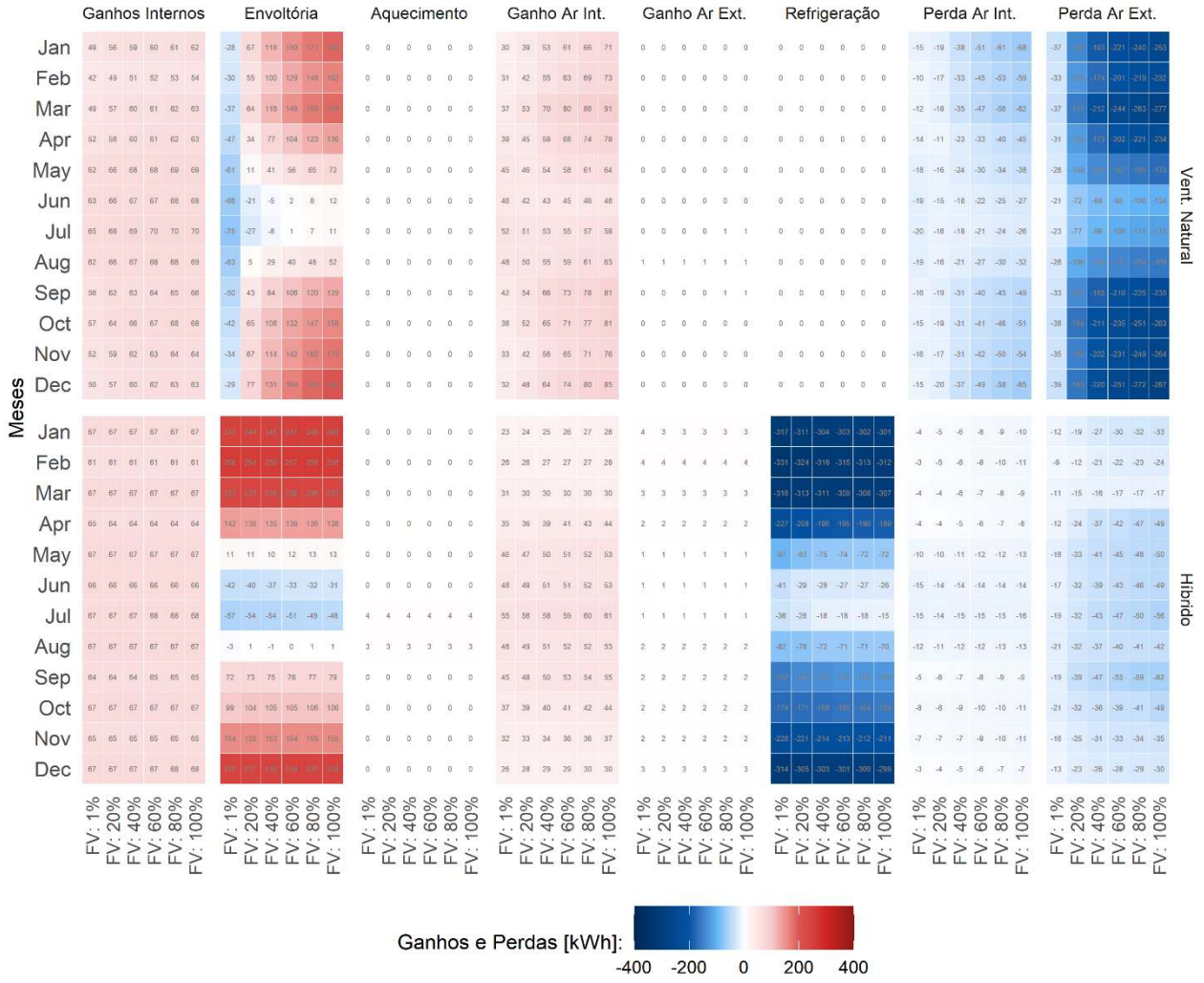


Figura 2 – Resultados balanço térmico convecção – completo.

Para o comportamento Híbrido (H), a Envoltória foi a principal fonte de ganho de calor ao longo dos meses mais quentes, chegando no valor de 258 kWh em fevereiro para o caso FV 100%, mas nos meses mais frios, os Ganhos Internos e o Ganho Ar Int. foram as principais fontes de ganho de calor da sala, chegando a valores de 68 kWh e 61 kWh, respectivamente, para o mês de julho e o caso FV 100%. A remoção da carga térmica foi efetuada principalmente pela Refrigeração, somente nos meses mais frios a perda de calor ocorreu pela Envoltória e pela Perda Ar Ext. (ventilação natural). Em valores anuais, a carga térmica de refrigeração variou entre 2088 kWh para o caso com FV 100% até 2320 kWh para o caso FV 1%. Comparando a troca de calor pela envoltória entre o comportamento Híbrido e Ventilação Natural, é possível visualizar que para o Híbrido, o calor transferido da envoltória para o ar foi mais elevado do que no VN nos meses mais quentes, por exemplo, em janeiro, a envoltória do caso FV 60% Híbrido, transferiu 247 kWh para o ar do ambiente, enquanto para o usuário VN foi transferido 150 kWh. Essa diferença se dá porque no comportamento H há a remoção de carga térmica pelo *Ideal Loads*, que controla a temperatura do ar do ambiente em 23 ºC, enquanto

no comportamento VN não há controle de temperatura, portanto, a remoção de carga térmica pela ventilação natural ocorre até alcançar o equilíbrio térmico entre as superfícies, cargas internas e o ar, podendo ser a uma temperatura menor ou maior do que 23 ºC.

Para o comportamento VN, quando adotado o FV 1%, a envoltória removeu calor do ar interno em todos os meses. Correlacionando com o PHFT, é possível indicar que as temperaturas internas estavam tão elevadas que, para alcançar o equilíbrio térmico, a envoltória retirou calor do ar do ambiente ao longo de todo o ano, uma vez que somente durante 35,1% das horas ocupadas as temperaturas operativas da sala estiveram entre 26 ºC e 18 ºC, sendo esse o PHFT mais baixo entre os casos com VN. Ainda correlacionando com o PHFT, conforme o FV aumenta há o aumento do PHFT, por exemplo, para o caso com FV 1% o PHFT foi igual a 35,7% e para o FV 100% foi igual a 60,9%, no balanço térmico é possível visualizar que a redução das temperaturas operativas internas é influenciada diretamente pela variável Perda Ar Ext.

A Figura 3 traz a análise detalhada das trocas de calor por convecção que ocorrem em cada superfície da envoltória da sala. Como esperado, no comportamento híbrido não houve variação significativa nas trocas de calor ao alterar o FV, mas é possível visualizar que a cobertura e as paredes internas (Par. Int.) são responsáveis por transferir grande parte de calor para o ar do ambiente, seguidas pelas superfícies piso e parede externa oeste (Par.Ext. O). Quanto as perdas de calor pela envoltória, essas ocorrem principalmente nos meses frios pela parede externa sul, cobertura e parede externa oeste, e ao longo de todo o ano pelas janelas. A perda de calor ao longo de todo o ano pelas janelas ocorre também no comportamento VN.

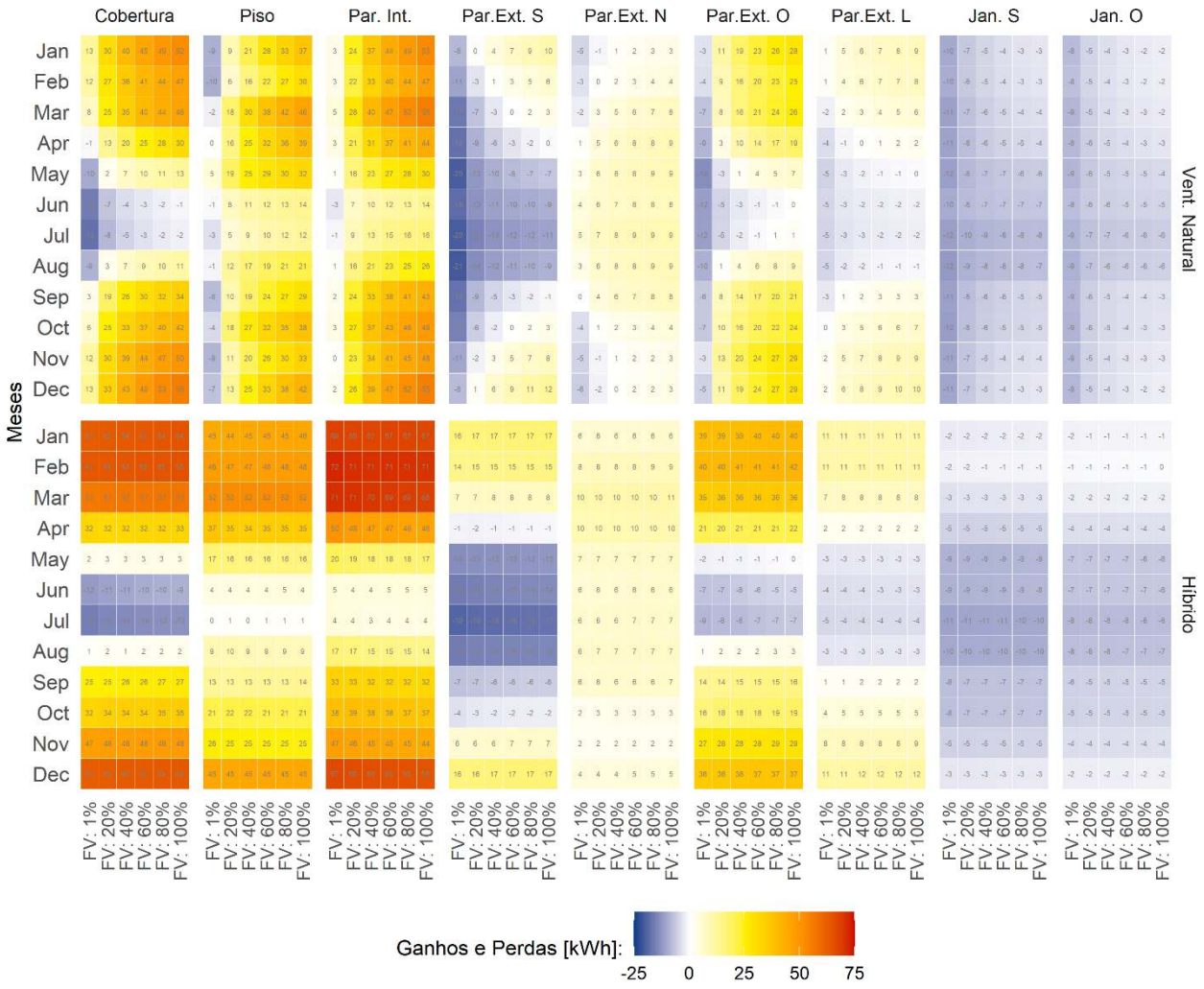


Figura 3 – Resultados balanço térmico convecção – envoltória.

Sobre o comportamento VN, é importante visualizar que mesmo para o caso FV 1%, em que o somatório total da envoltória indica que há a remoção de calor do ar da sala, a cobertura foi responsável por adicionar calor. Por exemplo, para janeiro, o somatório do mês indica que a cobertura adicionou 13 kWh a mais de calor do que removeu. Isso demonstra que estratégias construtivas na cobertura podem auxiliar na melhoria do

desempenho térmico, reduzindo a transferência de calor por essa superfície. Para a parede externa sul, conforme aumenta o FV, a perda de calor por essa superfície reduz, por exemplo, em julho para o FV 1% a remoção de calor pela parede sul foi igual a -20 kWh, enquanto para o FV 100% foi -11 kWh. Essa parede é a que tem a menor influência da radiação solar externa, portanto as temperaturas superficiais são mais baixas, o que promove a remoção de calor do ar do ambiente. A parede externa oeste, por sua vez, além de ter maior metragem quadrada, é mais exposta a radiação solar, o que aumenta a sua temperatura superficial e reduz a possibilidade de remover calor do ar do ambiente. A aplicação de sombreamento nessa superfície pode auxiliar na melhoria do desempenho térmico da sala.

A respeito do valor de carga térmica obtido para os casos com o comportamento Híbrido, com relação ao FV 1%, houve uma redução de carga térmica de refrigeração de 4,6%, 7,6%, 8,6%, 9,2% e 10,0%, para os casos FV 20%, FV 40%, FV 60%, FV 80% e FV 100%, respectivamente. Analisando o balanço térmico da Figura 2 e Figura 3, é possível indicar que combinar o aumento do FV com estratégias construtivas empregadas na envoltória podem auxiliar na redução da carga térmica. Por exemplo, a aplicação de isolamento térmico da envoltória reduzirá o ganho de calor nos meses mais quentes e a perda nos meses mais frios, para reduzir o ganho de calor pelas paredes internas, pode ser aplicado sombreamento nas janelas dos dormitórios, o que reduzirá as temperaturas desses ambientes adjacentes. Para o comportamento VN, poderiam ser indicadas estratégias similares, mas além do balanço térmico, é importante verificar as temperaturas internas, uma vez que somente com o balanço não é possível determinar se houve ou não melhoria do desempenho térmico da edificação. Entretanto, para aprimorar a análise e definição das estratégias a serem empregadas, além dos resultados aqui apresentados poderia ser executada a análise diária das trocas de calor, para verificar se ao longo do dia a envoltória mantém a característica de transferir calor para o ar do ambiente. Caso no período noturno ocorra perda significativa de calor, outras estratégias além do isolamento devem ser empregadas. Além disso, o balanço térmico na superfície pode auxiliar no entendimento em detalhe das trocas de calor, uma vez que há possível visualizar se o resultado para a convecção é influenciado principalmente pela condução que ocorre no elemento construtivo ou pela radiação solar proveniente das janelas, ou ainda outra troca de calor.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho aplica o método do balanço térmico por convecção (no ar do ambiente) como uma ferramenta de análise das trocas de calor nos ambientes para posterior definição e aplicação de estratégias construtivas que visem a melhoria do desempenho térmico da edificação. Este estudo faz parte da tese de doutorado da autora principal.

Com base nos resultados apresentados foi possível verificar que o balanço térmico por convecção é capaz de indicar quais as principais fontes de ganhos e perdas de calor do ambiente. Assim, o método pode ser utilizado para auxiliar na tomada de decisão para a escolha de estratégias que visem melhorar o desempenho térmico e energético de edificações.

Destaca-se que a variação no fator de ventilação, ainda que seja uma estratégia válida, apresentou baixa influencia no caso de estudo para o comportamento Híbrido, visto que a área de ventilação aumentou em oitenta vezes e o indicador de desempenho aumentou somente 9%. Ainda, o método permitiu identificar a necessidade de aplicar diferentes estratégias quando avaliada a edificação em modo Híbrido (H) ou com Ventilação Natural (VN). Para o modo H, identificou-se que a mudança no percentual de ventilação não teve impacto significativo no desempenho térmico, enquanto mudanças na cobertura podem ser benéficas para o caso de estudo. A avaliação mensal permitiu identificar o funcionamento da edificação nas diferentes estações do ano, podendo auxiliar ainda mais na tomada de decisão.

Assim, o método do balanço térmico pode ser adotado como uma ferramenta nas fases iniciais de projetos, identificando quais estratégias e superfícies devem sofrer alterações, a fim de garantir um melhor desempenho para a edificação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT TR 15575-1-1:2021 Errata 1:2021** - Edificações habitacionais - Desempenho Parte 1-1: Base-padrão de arquivos climáticos para a avaliação do desempenho térmico por meio do procedimento de simulação computacional. Rio de Janeiro, 2021a.

_____. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais - Desempenho. Parte 1: Requisitos Gerais. Rio de Janeiro, 2021b.

BRAGER, G. S.; DE DEAR, R. J. Thermal adaptation in the built environment: A literature review. **Energy and Buildings**, v. 27, n. 1, p. 83–96, 1998.

CÂNDIDO et al. Towards a Brazilian standard for naturally ventilated buildings: Guidelines for thermal and air movement acceptability. **Building Research and Information**, v. 39, n. 2, p. 145–153, 2011.

CRAWLEY, D.; LAWRIE, L. **Repository of free climate data for building performance simulation:** Brazil, Region 3 - South America, 2023. Disponível em: https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/BRA_Brazil/index.html. Acesso em: 9 mar. 2023.

DABAIEH et al. Reducing cooling demands in a hot dry climate: A simulation study for non-insulated passive cool roof thermal performance in residential buildings. **Energy and Buildings**, v 89, p 142–152, 2015.

DE VECCHI et al. ASHRAE 55 adaptive model application in hot and humid climates: The Brazilian case. **Architectural Science Review**, v 58, n 1, p 93–101, 2015.

DOE - UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus** (version 22.2) Disponível em: https://energyplus.net/. Acesso em: 11 jan. 2023.

UZUM, M. dos S. D.; GONÇALVES, J. C. S. The thermal performance of compact housing in tall buildings: an analytical examination for the retrofit of façades in the densified city centre of São Paulo. **Architectural Science Review**, v 64, n 1–2, p 56–71, 2021.

ELI, et al. Thermal performance of residential building with mixed-mode and passive cooling strategies: The Brazilian context. **Energy and Buildings**, v 244, n 1, 2021.

KRELLING, et al. A thermal performance standard for residential buildings in warm climates: Lessons learned in Brazil. **Energy and Buildings**, v 281, n 15, p 112770, 2023.

LABEEE - LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES; ELI, L. G. **ECV4202 – Análise Térmica de Edificações**. 2021. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/ensino/pos-graduacao/ecv4202. Acesso em: 19 dez. 2021.

MIRRAHIMI et al. The effect of building envelope on the thermal comfort and energy saving for high-rise buildings in hot-humid climate. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v 53, p 1508–1519, 2016.

PÉREZ-ANDREU et al. Experimental data and simulations of performance and thermal comfort in a typical mediterranean house. **Energies**, v 14, n 11, 2021.

RAMOS et al. Adaptive behaviour and air conditioning use in Brazilian residential buildings. **Building Research & Information**, v 49, n 5, p. 496-511, 2020.

RODRIGUES et al. Impact of Natural Ventilation on the Thermal and Energy Performance of Buildings in a Mediterranean Climate. **Building**, v 9, n 123, p 1 – 17, 2019.

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, n 1, p 1–13, 2016.

SPITLER, J. D. Thermal load and energy performance prediction. Em: HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. (org.). **Building Performance Simulation for Design and Operation**. Second edition. New York: Routledge, 2019. p. 13–75.

SU, B.; AYNSLEY, R. A case study of roof thermal performance in naturally ventilated houses in hot-humid climates under summer conditions. **Architectural Science Review**, v 49, n 4, p 399–407, 2006.

TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. **Energy Policy**, v 87, n December 2014, p 524–541, 2015.

VÁZQUEZ-TORRES, C. E.; GÓMEZ-AMADOR, A. Impact of indoor air volume on thermal performance in social housing with mixed mode ventilation in three different climates. **Energy and Built Environment**, v 3, issue 4, p 433 – 443, 2022.

VETTORAZZI et al. Optimization of the passive house concept for residential buildings in the South-Brazilian region. **Energy and Buildings**, v 240, n 1, p 110871, 2021.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.