ANÁLISE DO POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DA VENTILAÇÃO NATURAL E SEUS IMPACTOS NAS CONDIÇÕES DE CONFORTO TÉRMICO E DE RENOVAÇÃO DO AR INTERNO EM UMA EMEI, ATRAVÉS DO USO DE SIMULAÇÃO EVOLUTIVA.

Carolina de Mesquita Duarte (1); Naurienni Dutra Freitas (2); Maritza da Rocha Macarthy (3); Thalita dos Santos Maciel (4); Rodrigo Karini Leitzke (5); Juliana Al-Alam Pouey (6); Eduardo Grala da Cunha (7)

(1) Arquiteta, Mestranda em Arquitetura e Urbanismo, carolinademesquitaduarte@hotmail.com, PROGRAU-UFPel
(2) Engenheira Civil, Mestranda em Arquitetura e Urbanismo, naurienni@gmail.com, PROGRAU-UFPel
(3) Engenheira Elétrica, Mestranda em Arquiteta e Urbanista, maritzadarochamacarthy@gmail.com, PROGRAU-UFPel
(4) Arquiteta, Mestranda em Arquitetura e Urbanismo, thalita-maciel@hotmail.com, PROGRAU-UFPel
(5) Cientista da Computação, Mestrando em Arquitetura e Urbanismo, rodrigokarinileitzke@gmail.com, PROGRAU-UFPel
(6) Arquiteta, Doutoranda em Engenharia Civil, julianapouey@hotmail.com, PPGCI-UFRGS
(7) Arquiteto, Doutor em Arquitetura e Urbanismo, eduardogralacunha@yahoo.com.br, PROGRAU-UFPel

RESUMO

O cenário atual evidencia a importância de se discutir as estratégias de ventilação natural como apoio às condições de conforto térmico e de renovação do ar interno em edifícios institucionais. O objetivo deste trabalho é analisar o potencial de aproveitamento da ventilação natural em uma Escola Municipal de Educação Infantil (EMEI) localizada na Zona Bioclimática 2, a partir da influência de duas variáveis, o *setpoint* de temperatura e o percentual de abertura das janelas, através de uma análise de simulação computacional evolutiva. Em uma abordagem da otimização multifatorial, foram simuladas alternativas para a análise de estratégias de controle e de limites de disponibilidade de ventilação natural na EMEI, a fim de avaliar seus impactos no conforto térmico e nas renovações de ar no interior do ambiente. A análise do conforto térmico foi realizada com base no modelo adaptativo da ASHRAE Standard 55/2017. Os resultados indicaram que a combinação entre as variáveis que obteve as melhores soluções foi a que apresentou o setpoint de ventilação natural próximo aos 19ºC, já o fator de abertura mínimo (FAM) não apresentou um comportamento padrão. Ao relacionar conforto térmico e número de renovações, foi possível identificar que o aumento dos percentuais médios anuais de conforto térmico está atrelado aos maiores valores médios de renovações de ar.

Palavras-chave: ventilação natural, simulação computacional, simulação evolutiva

ABSTRACT

The current scenario highlights the importance of discussing natural ventilation strategies as a support for thermal comfort conditions and indoor air changes in institutional buildings. The objective of this paper is to analyze the potential of using the natural ventilation in the Municipal School of Early Childhood Education (EMEI) located in Bioclimatic Zone 2, from the influence of two variables, the temperature setpoint and the window opening percentage, through an evolutionary computational simulation analysis. In a multifactorial optimization approach, alternatives were simulated for the analysis of control strategies and natural availability limits for the windows of the EMEI, in order to evaluate their impacts on thermal comfort and air renewal within the environment. The thermal comfort analysis was performed based on the adaptive model of ASHRAE Standard 55/2017. The results indicated that the combination of variables obtained from the best solutions was the one that presented the natural ventilation setpoint close to 19°C, while the minimum opening factor (MAF) did not present a standard behavior. When relating thermal comfort and number of air changes, it was possible to identify that the increase in the average annual percentage of thermal comfort is linked to higher average values of air changes.

Keywords: natural ventilation, computer simulation, evolutionary simulation

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a demanda global de energia aumentou em torno de 1% ao ano (GSR, 2020). No Brasil, segundo a EPE (BEN, 2020) a demanda para climatização contribuiu significativamente para o crescimento do consumo total de energia. O uso de mecanismos de condicionamento de ar, além de elevar o consumo energético pode prejudicar a qualidade do ar interno (ARENHARDT, 2017), por este motivo, as estratégias passivas ligadas à ventilação natural, que consideram o clima local, são importantes aliadas para manter a qualidade interna do ambiente promovendo o conforto térmico dos usuários e garantindo a renovação do ar.

Um fator importante referente à qualidade do ambiente de trabalho ou de estudo é que este tem influência direta no desempenho dos indivíduos e na condição física e mental da saúde humana. Sendo o conforto térmico um fator psicológico e estando ligado ao bem-estar pessoal, ele pode afetar a concentração e produtividade dos usuários, por esta razão, o conforto térmico em edifícios destinados ao ensino é de extrema importância. (BARBHUIYA; BARBHUIYA, 2013). STRAUB et al. (2017), também destacam que o aprendizado e a produtividade em ambientes escolares estão diretamente relacionados às condições de conforto dos usuários.

Estudos como os de Souza (2018) e Goulart (2011) apontam a necessidade de melhorias relacionadas às condições de conforto térmico dos usuários nas escolas municipais do país. Para que sejam superadas as fragilidades do sistema educacional no Brasil, a arquitetura escolar é vista como uma das áreas de conhecimento que muito tem a contribuir. (DELIBERADOR, 2016). Grande parte das escolas públicas do país carecem de condições adequadas para o bom funcionamento de atividades intelectuais, podendo comprometer o processo de ensino-aprendizagem, além da saúde física e psicológica de alunos e professores. (PEREIRA; COUTINHO; SILVA, 2009).

Em edifícios públicos e comerciais em geral, utiliza-se o condicionamento artificial visando proporcionar conforto térmico aos ocupantes, no entanto, tratando-se desta tipologia específica de escolas públicas é recorrente a utilização da ventilação natural sem nenhum sistema artificial de condicionamento. Neste sentido, a ventilação natural é uma importante estratégia utilizada na busca de manter boas condições de conforto térmico nestes locais, favorecendo ainda a circulação do ar no ambiente. Parâmetros chave de desempenho de ventilação natural, incluem modelos que consideram o uso de janelas, taxas de trocas de ar e porcentagens de horas ocupadas, onde requisitos mínimos de taxas de ventilação devem ser cumpridos. (BELLERI; LOLLINI; DUTTON, 2014).

A ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017) apresenta dois modelos de conforto térmico, o analítico, baseado no modelo de Fagner (1970), através dos índices de PMV (*Predicted Mean Vote*) e PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*), e o adaptativo, que avalia edificações ventiladas naturalmente baseado nas aceitabilidades térmicas preditas de 80% e 90%. A norma americana, aponta ainda que para a aceitabilidade do ar interno, 80% ou mais dos usuários, não devem expressar insatisfação. Segundo o *Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations* (REHVA), a partir da ISO 17772-1:2017 e EN 16798-1:2019 foi possível definir parâmetros que classificam os ambientes em categorias baseadas em taxas de ventilação, as escolas foram classificadas na Categoria I. O parâmetro relacionado à taxa de ventilação e índices de ventilação cruzada admitido para salas de aula em edifícios escolares é estimado em 5 trocas de ar por hora.

No Brasil, algumas normas discorrem sobre parâmetros de conforto térmico e qualidade do ar, definindo temperaturas, velocidade do ar e umidade relativa para os ambientes. Como, a ABNT NBR 16401-2 (2008), que apresenta parâmetros mais detalhados de conforto em ambientes climatizados artificialmente e é baseada na ASHRAE 55. Já a NR 17 (1990), apresenta de forma superficial as condições térmicas aceitáveis para ambientes de trabalho. E a resolução-RE nº 9, da ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária), publicada em 16 de janeiro de 2003, traz padrões de qualidade do ar em ambientes climatizados artificialmente.

O conforto térmico e a qualidade do ar podem ser favorecidos com o ajuste da velocidade do ar, principalmente com temperaturas mais elevadas, além da disponibilidade de controle pessoal dos dispositivos de ventilação dos ambientes (DE DEAR; BRAGER 2002). Diversos estudos avaliam a importância da ventilação natural para regulação do conforto térmico do indivíduo, correlacionando questões de taxas de ventilação, *setpoint* e percentual de abertura das janelas, entre outros parâmetros que auxiliam nesse processo. Nico-Rodrigues et al. (2015), destacaram a importância da ventilação natural para amenizar as temperaturas internas, bem como o uso de dispositivos de sombreamento que protejam da incidência solar nos períodos mais quentes, mas que ainda assim possibilitem manter a ventilação constante por um período maior. Já Jeffe e Westphal (2015), analisaram o potencial de aproveitamento da ventilação natural em quartos de internação hospitalar localizados na cidade de São Paulo, través da variação do s*etpoint* e do percentual de abertura, o estudo indicou que o maior percentual de abertura junto a menor temperatura de *setpoint* apresentaram mais horas de conforto dentro do limite de aceitabilidade de 90% e uma maior

quantidade de horas no ano com vazão acima do limite 216m^3/h. O trabalho de Oliveira e Carlo (2021), indicou que o aumento das taxas de renovação de ar acarretou no aumento do conforto térmico em salas de aula e escritórios.

Considerando a complexidade de avaliação de todos os parâmetros que compõem os edifícios, a otimização baseada em simulação tem sido utilizada para resolução de problemas frequentemente conflitantes. Esse processo corresponde à combinação de um *software* de simulação acoplado a algum algoritmo de otimização (BRE; FACHINOTTI, 2017) e indica maiores chances para obtenção de bons resultados, já que nesse caso busca-se uma estratégia que passe a atender mais adequadamente a objetivos específicos já determinados, visando a maximização do caminho para alcançar projetos de edificações com melhor desempenho (FONSECA *et al*., 2017).

Atualmente, os algoritmos evolutivos (AE) são utilizados na grande maioria desses estudos (EVINS, 2013). Estes algoritmos surgem como uma vertente da programação evolutiva (FOGEL, 1962), baseiam-se nos mecanismos da evolução biológica, e uma de suas principais características é a utilização de múltiplas funções-objetivo. Estudos como os de Fonseca *et al*. (2017), Dalbem (2018), Linczuk e Bastos (2020) e Leitzke *et al*. (2021) utilizam estes algoritmos através da otimização multiobjetivo para definição de estratégias de melhoria do desempenho de edificações residenciais. Em outro estudo, Maciel *et al.* (2021, no prelo) analisa o comportamento de quatro algoritmos evolutivos para otimização multiobjetivo de uma edificação escolar. Neste caso, evidencia o desempenho do algoritmo SPEA2 (ZITZLER *et al*., 2001), utilizado também no presente estudo, discutindo parâmetros de melhoria para o desempenho termoenergético do edifício.

2. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo analisar o potencial de aproveitamento da ventilação natural e seus impactos nas condições de conforto térmico e de renovação do ar interno, para ambientes de permanência prolongada de uma Escola Municipal de Educação Infantil (EMEI), por meio do uso de ferramenta de simulação computacional através de uma análise de simulação evolutiva.

3. MÉTODO

No intuito de atingir o objetivo proposto, o método deste trabalho foi divido em 4 etapas principais. Na primeira etapa foi determinado o objeto de estudo utilizado para a análise. Na segunda etapa foram definidas e configuradas as características físicas e de uso do modelo. A terceira etapa consiste na delimitação das variáveis de otimização e seus respectivos intervalos de medida, assim como, na definição do algoritmo evolutivo utilizado para a execução da estratégia de otimização adotada. E, por fim, com base nos resultados obtidos, foi realizada a análise dos resultados.

3.1. Definição do objeto de estudo

O objeto de estudo corresponde a uma edificação escolar com projeto-padrão desenvolvido pelo Programa Proinfância (FNDE, 2017). A tipologia 2 foi escolhida devido à deliberação do Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE), que estipulou que os recursos para implantação de novas Escolas Municipais de Educação Infantil (EMEIs) na cidade de Pelotas-RS, Zona Bioclimática 2, fossem destinados para construção de projetos-padrão com esta tipologia.

A edificação possui 890,33m² de área construída e capacidade de acolhimento de até 94 crianças em turno integral ou 188 em turnos alternados. Conforme representa a Figura 1, os ambientes são distribuídos entre os setores pedagógico, administrativo, serviço, pátio coberto e áreas de uso transitório.

Quanto às zonas térmicas analisadas neste estudo, foram selecionados dois ambientes de permanência prolongada destinados às crianças, Creche I e Creche II, por serem semelhantes em suas características, porém com orientações solares antagônicas, assim como mostra a Figura 1. A orientação da edificação foi determinada com base no trabalho de Maciel et al. (2021, no prelo), onde a melhor solução da análise direciona as maiores fachadas à Norte/Sul. Sendo assim, seguindo a orientação determinada, a Creche I apresenta a fachada com maior área envidraçada para Sul e a Creche II para Norte.Para os dois ambientes analisados, a fachada com maior área envidraçada possui um solário e um PAF de 60%, já a fachada com a menor área envidraçada, não possui solário e apresenta um PAF de 30%, como mostra a Figura 2.

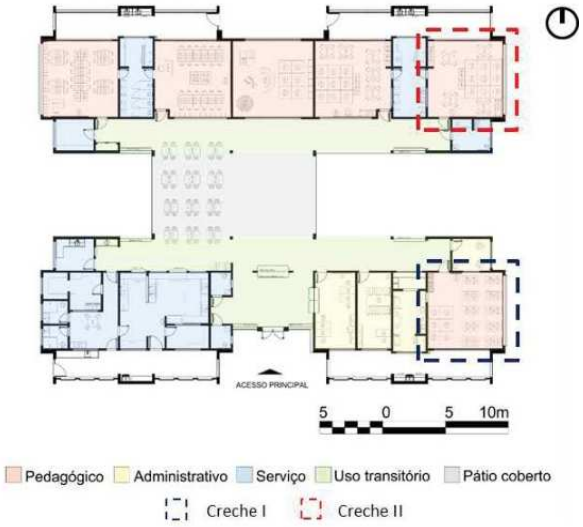

Figura 1 - Planta Baixa indicando as zonas térmicas analisadas no objeto de estudo (Adaptado de FNDE, 2021).

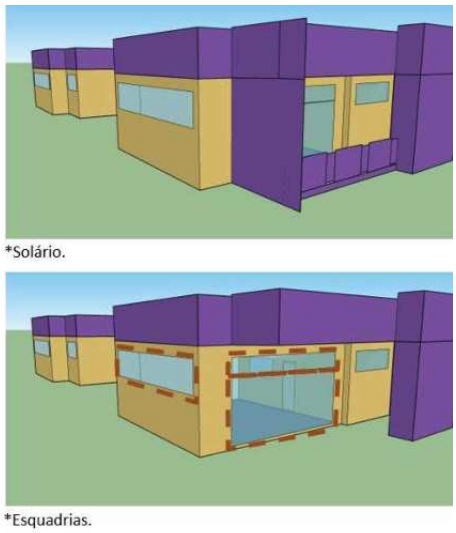

Figura 2 – Detalhe do solário e das esquadrias dos ambientes analisados.

3.2. Caracterização do modelo computacional

A edificação apresenta um sistema construtivo convencional, com estrutura em concreto armado e fechamentos verticais em tijolos cerâmicos furados, com dimensões de 9x19x39cm, para as paredes internas e 14x19x39cm, para as externas. A Tabela 1 apresenta as principais propriedades da envoltória, calculadas de acordo com o método apresentado na NBR 15220-2 (ABNT, 2005).

Tabela 1 - Principais propriedades da envoltória.

Elemento	Composição	R (m²/WK)	U [W/(m²k)]	CT (kJ/m²K)
Paredes externas	Reboco externo	0,5384	1,86	189,05
	Cerâmica			
	Câmara de ar			
	Cerâmica			
	Reboco interno			
Paredes internas	Reboco interno	0,4363	2,29	151,53
	Cerâmica			
	Câmara de ar			
	Cerâmica			
	Reboco interno			
Piso	Piso vinílico	0,2171	4,61	245,82
	Laje em concreto			
Cobertura	Telha termoacústica com PIR	3,1284	0,32	16,39
	Câmara de ar			
	Forro mineral			

Com relação às cores, adotou-se uma padronização na qual as paredes internas, paredes externas e cobertura possuem pintura em cor única e absortância igual a 0,2. As esquadrias são de alumínio natural, com exceção das portas internas, que são em madeira compensada. Os vidros das janelas são temperados, com espessura de 6 mm.

A etapa de modelagem foi realizada através do *software SketchUp* PRO 2019 juntamente com o *plugin Legacy Open Studio 1.0.13* (Figura 3). Para configuração do modelo numérico foram utilizadas as especificações de projeto presentes no memorial descritivo fornecido pelo FNDE (FNDE, 2017).

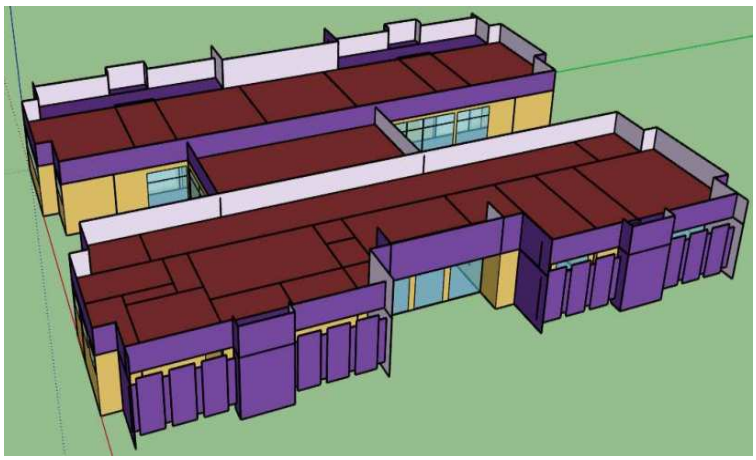

Figura 3 - Modelo tridimensional da EMEI tipo 2 utilizando o *SketchUP* (Autores, 2021).

A simulação foi realizada para a Zona Bioclimática 2 (ZB2), representada pela cidade de Pelotas-RS, através do arquivo climático utilizado elaborado por Leitzke *et al*. (2018). As temperaturas do solo foram definidas através de um pré-processador do *EnergyPlus*, denominado *Slab*.

Para caracterização do comportamento de ocupação da edificação, foram utilizados os dados fornecidos pela 5ª Coordenadoria Regional de Educação de Pelotas (5ª CRE Pelotas), através da previsão do número de usuários e do horário de realização das atividades na escola, que acontece entre 7:30h e 17:30h, de segunda a sexta-feira, com exceção dos feriados.

Para determinação das cargas internas decorrente do metabolismo dos usuários dos ambientes utilizou-se o método de cálculo de superfície corporal pela Equação de DuBois (DuBois, 1916), levando em consideração o peso e a altura dos usuários por uma média de faixa etária, devido ao compartilhamento dos ambientes entre adultos e crianças.

A configuração dos ganhos internos de iluminação e equipamentos foi realizada com base nos projetos complementares fornecidos pelo FNDE (FNDE, 2017). O sistema de iluminação foi configurado de acordo com os valores obtidos a partir do projeto elétrico e do cálculo da Densidade de Potência Instalada (DPI) de cada zona térmica. Para os equipamentos, o mesmo procedimento foi adotado.

O sistema de ventilação adotado foi o de ventilação natural seletiva, ou seja, o controle das aberturas é feito em razão da temperatura, as janelas abrem quando a temperatura interna do ambiente é superior à externa e se a temperatura da zona térmica for maior do que a temperatura de controle (*setpoint*). Dessa forma, na intenção de maximizar as condições de conforto térmico e de renovação do ar para uma EMEI situada em Pelotas, foi aplicada a simulação multiobjetiva, onde, os parâmetros de *setpoint* e fator de abertura das janelas sofreram variações de seus limites ao longo das simulações evolutivas. Já a *Schedule* de funcionamento se manteve constante, de acordo com o horário de funcionamento da EMEI.

3.3. Delimitação das estratégias de otimização

Para configurar o sistema de ventilação natural adotado para este estudo, primeiramente foram definidos os parâmetros que teriam seus limites variados ao longo das simulações evolutivas, sendo eles, a temperatura de controle (*setpoint*) e o percentual de abertura das janelas, e em seguida determinou-se os limites inferiores e superiores de cada parâmetro, indicados na Tabela 2.

Na ausência de especificação em norma nacional do *setpoint* de temperatura para controle das aberturas em edificações públicas ou comerciais ventiladas naturalmente, o setpoint mínimo de 19ºC, foi determinado com base nas recomendações da INI-R - Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (CB3E, 2020) e do Projeto de Emenda ABNT NBR 15575-1 (ABNT, 2020), apesar de ambas serem destinadas a edifícios residenciais. O *setpoint* máximo foi definido em 25ºC, considerando que, a Temperatura Neutra (TN) para cidade de Pelotas-RS no momento mais quente do ano é próxima de 25°C, de acordo com as equações de 80% de aceitabilidade do conforto adaptativo da ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017), então, um valor maior poderia gerar um superaquecimento no interior dos compartimentos e elevar o desconforto dos usuários.

Desse modo, temos 25ºC como condição limítrofe para ventilação natural no verão, ou seja, o edifício não irá ventilar quando atingir temperaturas maiores ou iguais a este limite, enquanto que para o inverno, com o limite mínimo de diferença em até 6ºC, a temperatura para ventilação poderá variar até alcançar os 19ºC. Estes limites significam que deve ser permitida a abertura das janelas quando a temperatura interna do

ambiente for igual ou superior ao *setpoint* e a temperatura interna for superior à temperatura externa, ou seja, no verão, quando dentro do ambiente estiver 25ºC e no exterior igual ou maior, ele não irá abrir a janela e ventilar, e no inverno quando a temperatura interna estiver abaixo de 19ºC ocorre o mesmo. Já o fator de abertura é o percentual de abertura das janelas quando abertas para ventilação, onde, os valores máximos e mínimos consideram os extremos de abertura de uma esquadria e não os especificados no projeto padrão.

Tabela 2 - Parâmetros de simulação para ventilação natural.

Parâmetros de simulação	Limites
Fator de abertura das janelas	10% à 95%
Setpoint da ventilação natural	19ºC à 25ºC
Tipo de controle da ventilação natural	por temperatura (25ºC)
Limite máximo para o verão	0ºC
Limite mínimo para o inverno	6ºC

3.3.1. Definição do algoritmo evolutivo

Atualmente, muitos trabalhos têm utilizado algoritmos evolutivos para análise do desempenho de edificações. Grande parte destes estudos utilizam como critério de avaliação dos indivíduos das suas populações a curva de Pareto Front, ou Fronteira de Pareto, através dos algoritmos NSGA-II (DEB *et al*., 2002) e SPEA2 (ZITZLER *et al*., 2001), considerados referência para área.

Para este estudo, a definição do algoritmo baseou-se no trabalho de Maciel *et al.* (2021, no prelo) que analisou o desempenho de quatro algoritmos multiobjetivo através do mesmo objeto de estudo do presente trabalho. Neste caso, o SPEA2 apresentou o melhor desempenho, tanto computacional quanto com relação aos resultados das funções objetivo, e por isso será aplicado no decorrer das análises.

3.3.2. Estratégias de implementação

Para avaliação dos modelos, além do *EnergyPlus*, também foi utilizada a linguagem de programação de computadores *Python*. Além destes, a plataforma *BESOS* é utilizada na busca pela relação entre os recursos implementados em bibliotecas do Python com as simulações térmicas e energéticas do EP. Esta plataforma foi desenvolvida em 2019 pelo *Energy Incities da Victoria University no Canadá* (ENERGY INCITIES, 2020) e possibilita a integração de elementos evolutivos com a simulação dos modelos edificados realizada pelo *EnergyPlus*.

Dos recursos ofertados pela *BESOS*, a biblioteca *Python* chamada *platypus* apresenta a implementação do algoritmo evolutivo utilizado para análise, e também possibilita a integração com os recursos da biblioteca *eppy* que comunica o *Python* com o *EnergyPlus*. Além disso, também foram utilizadas as bibliotecas de programação *plotly* (para análise de padrão das soluções obtidas) e o ambiente *Jupyter Notebook* (interface para programação e visualização das saídas).

A avaliação dos indivíduos foi realizada com base nos valores das funções-objetivo, que para este estudo foram definidas como Conforto adaptativo médio com 80% de aceitabilidade, com base no modelo adaptativo da ASHRAE Standard 55 (2017), correspondendo ao eixo y do plano cartesiano de representação, e também o número médio de renovações por hora, referente ao eixo x. Os dados de ambos os objetivos foram obtidos por meio dos relatórios de saída da simulação do *EnergyPlus* através das variáveis Zone Thermal Comfort ASHRAE 55 Adaptive Model 80% Acceptability Status e AFN Zone Infiltration Air Change Rate, considerando a média anual.

A definição do tamanho da população inicial também foi baseada no trabalho de Maciel *et al.* (2021, no prelo), que realizou este procedimento através da equação que define o tamanho de uma amostra com base no tamanho da população, da margem de erro e do escore z (DANIEL; CROSS, 2018). O tamanho da amostra obtida para a formação das populações foi de 69 indivíduos e considera uma margem de erro (e) de 10% e um escore z (z) de 1,65, que corresponde a um nível de confiança de 90%.

4. RESULTADOS

Para análise dos resultados foram avaliadas as Creches I e II através do algoritmo evolutivo SPEA2 em combinação com a simulação computacional com o *software EnergyPlus*. Primeiramente são apresentados os resultados referentes a zona térmica Creche I e, em seguida, os da Creche II.

A Figura 4 apresenta a relação multiobjetivo entre o percentual de conforto térmico adaptativo com 80% de aceitabilidade e o volume de renovação de ar por hora na Creche I. Observando a proximidade entre os pontos de Pareto (círculo vermelho) e as soluções não-dominadas ou não-ótimas (xis azul), percebe-se

uma correlação positiva entre as duas variáveis no comportamento da distribuição evolutiva, visto que o aumento no volume de renovações de ar por hora na Creche I inferiu em um aumento no seu percentual de conforto térmico adaptativo. Enquanto a solução com menor percentual de conforto apresentou 45,51%, tendo 5,4 renovações por hora, o melhor cenário em termos de conforto da Creche I apresentou 47,57%, com 7,7 renovações por hora. Apesar da diferença de percentual de conforto ser pequena, observa-se, uma diferença de 2% no conforto térmico anual médio a partir do acréscimo de 2 renovações de ar.

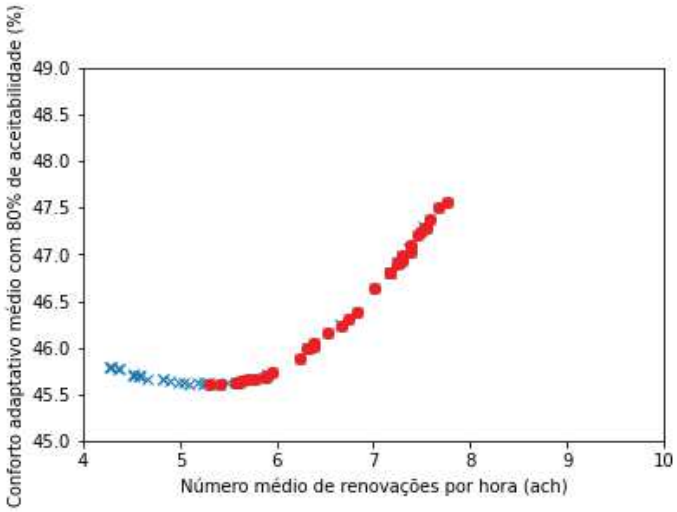

Figura 4 - Relação multiobjetivo entre o conforto adaptativo e o número de renovações de ar da Creche I (Autores, 2021).

A Figura 5 mostra a combinação entre as variáveis testadas durante a execução do algoritmo evolutivo para Creche I. Através deste gráfico é possível identificar alguns padrões quanto ao comportamento originário das melhores soluções, visto que os menores *setpoints* para ventilação natural (próximos do limite inferior de 19°C) resultaram no conjunto de soluções com os melhores percentuais de conforto (próximos de 50%). As três janelas dos ambientes analisados operam de forma separada, obtendo resultados distintos para o fator de abertura mínimo (FAM), onde, este parâmetro não apresentou um comportamento passível de identificação de padrão, a medida que, de acordo com a definição do *setpoint* de ventilação, o FAM próximo do limite superior ou inferior manteve condições de maximização das variáveis-objetivo (*setpoints* de ventilação próximos do limite inferior) ou de minimização das variáveis-objetivo (*setpoints* de ventilação próximos do limite superior). Pode-se afirmar, portanto, que as variáveis de FAM para a Creche I tiveram uma forte dependência da variável de definição do *setpoint* de ventilação.

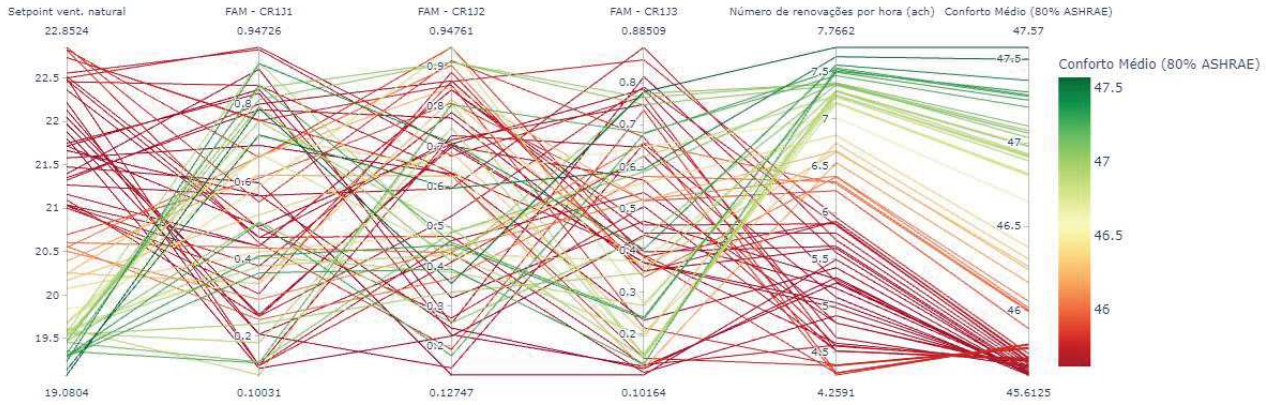

Figura 5 - Gráfico de coordenadas paralelas para as variáveis testadas no processo evolutivo da Creche I (Autores, 2021).

A Figura 6 apresenta o comportamento do multiobjetivo para a Creche II, considerando como variáveis-objetivo o conforto adaptativo com 80% de aceitabilidade e o volume de renovações de ar por hora, assim como na zona apresentada anteriormente. Ainda que com quantitativos maiores, o aumento nos indicadores do número de renovação de ar para a Creche II, assim como visto para Creche I, implicaram em um aumento nas condições de conforto. Os pontos de Pareto (círculo vermelho) e as soluções não dominadas (xis azul) estão próximos dentro da solução, indicando também uma condição de correlação positiva entre as duas variáveis testadas, assim como visto na Creche I.

O pior cenário avaliado neste ambiente apresentou um percentual médio de conforto anual de 45,35% com um número médio de 5,3 renovações por hora. Entretanto, no melhor cenário identificado na análise, um percentual de conforto de 48,72% com uma renovação média de 9,1 ACH. Para Creche II, a diferença no percentual de conforto obtido também foi pequena, apresentando um aumento de 3,37% no percentual médio de conforto térmico anual para um aumento de 3,8 ACH.

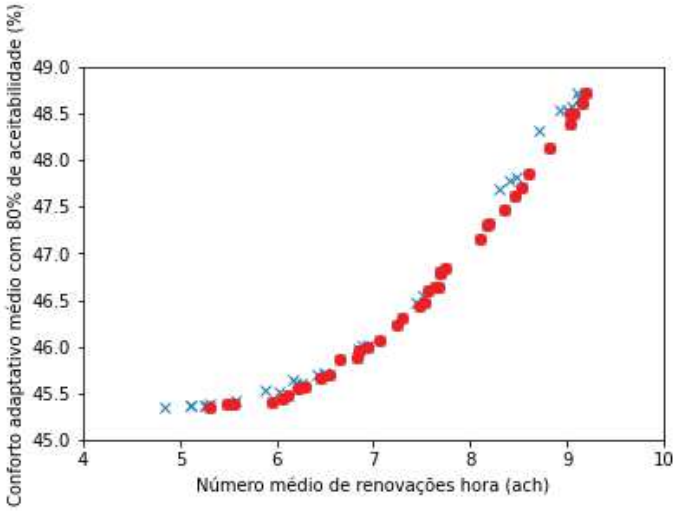

Figura 6 - Relação multiobjetivo entre o conforto adaptativo e o número de renovações de ar da Creche II (Autores, 2021).

A Figura 7 apresenta o gráfico de coordenadas paralelas para a Creche II. Assim como visto na Figura 4 para Creche 1, o *setpoint* de ventilação natural com indicadores próximos do limite inferior (19°C) resultaram em condições de maximização do número de renovações de ar e de conforto térmico adaptativo melhores do que que os indicadores selecionados no processo evolutivo com *setpoints* de ventilação natural maiores. A condição do FAM para as janelas da Creche II foi inconclusiva, assim como no caso da Creche I, visto que a variação dos FAM para as duas janelas da Creche II apresentam uma relação de dependência para com o *setpoint* de ventilação natural, sendo as temperaturas definidas pelo algoritmo determinantes para condições mais ou menos favoráveis no volume de renovações e no conforto térmico deste ambiente.

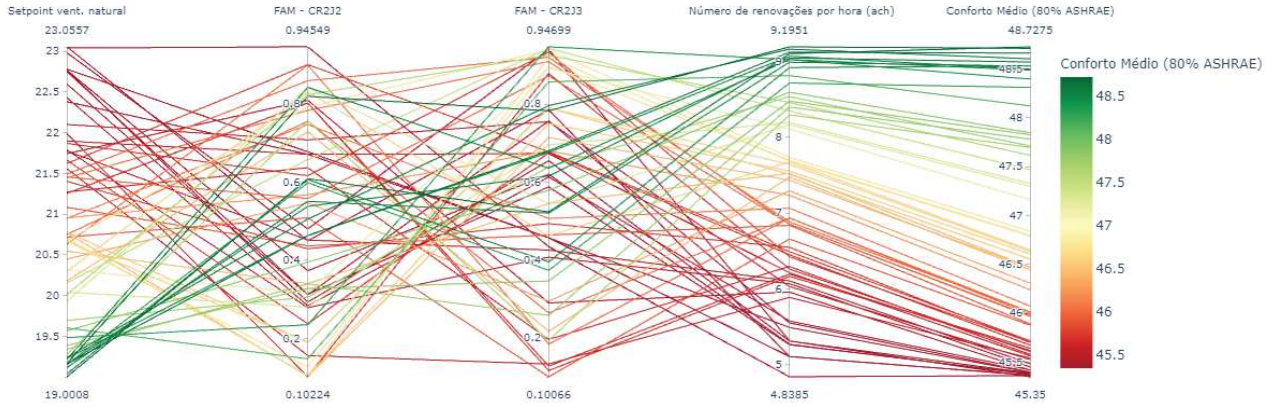

Figura 7 - Gráfico de coordenadas paralelas para as variáveis testadas no processo evolutivo da Creche II (Autores, 2021).

Comparando-se os resultados encontrados para cada uma das zonas térmicas analisadas, podemos observar que apesar das variáveis terem comportamentos semelhantes, enquanto na Creche I o maior percentual de conforto térmico foi obtido com um número médio de 7,7 renovações por hora (ACH), na Creche II foi obtido percentual de conforto próximo, porém com mais de 9 ACH.

As diferenças de temperaturas internas destes ambientes, em função de suas orientações (Creche I abertura voltada para o norte, Creche II abertura voltada para sul) pode ter limitado as renovações em função da limitação do *setpoint* para controle da abertura das janelas, no entanto, isto pouco influenciou nos percentuais de conforto térmico nos resultados do estudo. Isto pode indicar que talvez a quantidade de renovação de ar não influencie tanto nas condições de conforto térmico quando limitamos a possibilidade do acionamento das aberturas

É importante salientar, ainda, que foram obtidos valores médios anuais para as variáveis analisadas, e estes ambientes podem ter comportamentos diferentes no inverno e verão em relação aos percentuais de desconforto, não analisados separadamente.

5. CONCLUSÕES

O objetivo do trabalho de analisar a influência de duas variáveis da ventilação natural, sendo elas o *setpoint* de temperatura para abertura das janelas e o percentual de abertura destas, e seus impactos nas condições de conforto térmico e de renovação do ar interno, utilizando como objeto de estudo uma EMEI e valendo-se do uso de simulação evolutiva, foi atingido. Observando-se os resultados apresentados, concluímos que o aumento no percentual de conforto térmico esteve diretamente relacionado com as maiores taxas de renovação de ar obtidas nas zonas térmicas avaliadas.

O aumento dos valores médios anuais de conforto térmico atrelado ao aumento dos valores médios de ACH, indicam que a estratégia de maximização da ventilação destes ambientes, desde que acompanhada de uma faixa de temperatura adequada, pode ser entendida como uma medida para manutenção das condições de conforto e da qualidade do ar interno destes espaços.

No caso das EMEIs, por se tratarem em grande maioria de ambientes escolares sem climatização, estas carecem ainda de uma preocupação adicional com as estratégias passivas na prática projetual e de composição dos fechamentos, visando ampliar as condições de conforto de acordo com cada contexto climático. Observa-se que os percentuais médios anuais de conforto térmico não chegaram a 50% na avaliação realizada.

Por fim, as variáveis de *setpoint* de temperatura e o percentual de abertura das janelas têm influência direta no potencial de aproveitamento da ventilação natural, considerando as condições de conforto térmico e as taxas de renovações de ar em ambientes escolares, em razão disto, outros estudos relacionando ambas variáveis, em outros climas e analisando percentuais mensais de conforto e desconforto por calor ou frio separadamente, podem auxiliar na compreensão desta influência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.220-2: Desempenho Térmico de Edificações – Parte 2: Métodos de cálculos da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações). Rio de Janeiro: ABNT, 2005a.**

_____. **Projeto de Emenda ABNT NBR 15575-1. 2020.** Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/documents/DT_NBR-15575-1_Emenda_Out2020.pdf>. Acesso em: fevereiro de 2021.

ARENHARDT, Nilmar Luís. **Análise das condições de conforto térmico e a influência da renovação de ar em salas de aula de estudantes universitários.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2017. Disponível em: < http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/6483>. Acessado em junho, 2021.

ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.** Atlanta, 2017**.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 16401-2**: Instalações de ar condicionado – Sistemas centrais e unitários Parte 2: Parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro, 2008.

BARBHUIYA, Saadia; BARBHUIYA, Salim. Thermal confort and energy consumption in a UK educational building. **Building and Environment**, v.68, p. 1-11, 2013.

BELLERI, Annamaria; LOLLINI, Roberto; DUTTON, Spencer M. Natural ventilation design: An analysis of predicted and measured performance. **Building and Environment**, v. 81, p. 123-138, 2014.

BRASIL. **Projeto Proinfância Tipo 2.** Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação – FNDE. Brasília, 2017. Online. Disponível em: http://www.fnde.gov.br/index.php/programas/proinfancia/eixos-de atuacao/projetos-arquitetonicos-para-construcao/item/6413-proinfancia-tipo-2 >. Acesso em: 20 ago. 2020.

BRASIL. **Resolução RE nº 9, de 16 de janeiro de 2003**. Determina a publicação de Orientação Técnica elaborada por Grupo Técnico Assessor, sobre Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior, em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo. Disponível em: <https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2003/rdc0009_16_01_2003.html>. Acesso em junho, 2021.

BRE, F; FACHINOTTI, V. **A computational multi-objective optimization method to improve energy efficiency and thermal comfort in dwellings.** Energy and Buildings, v. 154, 283–294, 2017.

CB3E. CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais.** 2020. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/documents/2020.11.09-INI-R_V1.pdf>. Acesso em: fevereiro de 2021.

DALBEM, R. **Desempenho de edificação residencial no Sul do Brasil sob a ótica energética e econômica: da NBR 15575 a Passive House.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

DANIEL, W. W.; CROSS, C. L. **Biostatistics: a foundation for analysis in the health sciences.** Wiley, 2018.

DEB, K. et al. **A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE transactions on evolutionary computation,** v. 6, n. 2, p. 182–197, 2002.

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

DELIBERADOR, M. S. **Parâmetros da arquitetura escolar e o jogo de cartas como ferramenta de apoio ao desenvolvimento do programa arquitetônico.** 2016. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Civil e Arquitetura, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2016.

Du Bois D, Du Bois EF. **A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known**. 1916. Nutrition. 1989 Sep-Oct;5(5):303-11; discussion 312-3. PMID: 2520314.

___. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional de 2020, Ano Base 2019**. MME, 2021 Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>. Acessado em fevereiro, 2021.

ENERGY INCITIES. **Building and Energy Systems Optimization and Surrogate-modelling – BESOS.** Disponível em: <https://gitlab.com/energyincities/besos/>. Acesso em: 7 out. 2020.

EVINS, R. **A review of computational optimization methods applied to sustainable building design.** Renewable and sustainable energy reviews, v. 22, p. 230–245, 2013.

FOGEL, L. J. Autonomous automata. **Industrial Research Magazine,** v. 4, p. 14–19, 1962.

FONSECA, L. P. G.; NUNES, V. D. L.; SANTANA, L. O.; CARLO, J. C.; CÉSAR JÚNIOR, K. M. L. Otimização multiobjetivo das dimensões dos ambientes de uma residência unifamiliar baseada em simulação energética e estrutural. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 267-288, jan./mar. 2017.

GOULART, B. **A Conversa da Escola com a Cidade: teorias e práticas de aproximação entre arquitetura, urbanismo e educação.** Memorial de Qualificação de Mestrado em Arquitetura. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

GSR 2020 - **Global Status Report – Renewables 2020**. Disponível em: <https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf>. Acessado em: out. 2020.

JEFFE, Ana Paula Magalhães; WESTPHAL, Fernando Simon. desempenho térmico de um ambiente corporativo naturalmente ventilado em Florianópolis, SC. In: XIII Encontro Nacional e IX Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído, 2015, Campinas. **Anais**... Campinas, 2015.

KURNITSKI, J.; BOERSTRA, A.; FRANCHIMON, F.; MAZZARELLA, L.; HOGELING, J.; HOVORKA, F.; SEPPÄNEN, O. REHVA COVID-19 guidance document. 2020. Available online: https://www.rehva.eu/fileadmin/user_upload/REHVA_COVID-19_guidance_document_ver2_20200403_1.pdf (acesso em 04 de fevereiro de 2020).

OMITIDO, R et al. Algoritmo para análise evolutiva multiobjetivo em simulações termoenergéticas. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Carlos, v.16, n.1, p.24-42, 2021.

OMITIDO, R. K. et al. Optimization of the Traditional Method for Creating a Weather Simulation File: The Pelotas.epw Case**. Journal of Civil Engineering and Architecture**, v. 12, p. 741-756, 2018.

LINCZUK, V. C. C.; BASTOS, L. E. G. Otimização multiobjetivo orientada ao desempenho térmico para o projeto de edificações de baixo consumo de energia na Região Sul do Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 509-529, out./dez. 2020.

OMITIDO, T. et al. Otimização termoenergética de uma edificação escolar: discussão sobre o desempenho de quatro algoritmos evolutivos multiobjetivo, **Ambiente Construído**, Porto Alegre, 2021. No prelo.

NICO-RODRIGUES, E. A.; ALVAREZ, C. E.; SANTO, A.D.; PIDERIT, M. B. Quando a janela define a condição de desempenho térmico em ambientes ventilados naturalmente: caso específico das edificações multifamiliares em Vitória, ES. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 15, n. 2, p. 7-23, abr./jun. 2015.

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

OLIVEIRA, M. M.; CARLO, J. C. Avaliação do conforto térmico e renovação de ar em ambientes com chaminés solares. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 293-314, jan./mar. 2021.

PEREIRA, DAM; COUTINHO, A. S.; SILVA, L. B. Análise das condições de conforto térmico e da inércia térmica a que professores das escolas municipais de João Pessoa–PB estão submetidos. ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, v. 24, 2009.

SOUZA, L. N. de. **Arquitetura escolar, parâmetros de projeto e modalidades de aprendizagem.** Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.

STRAUB, K. et al. Determinação da temperatura de neutralidade em salas de aula do ensino superior para as zonas bioclimáticas do estado de Mato Grosso. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 97-109, jan./mar. 2017.

ZITZLER, E. et al. **SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm.** TIK-report 103 - Department of Electrical Engineering. Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, Zurich, 2001.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).