SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COMO FERRAMENTA NA AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO DE SALAS DE AULA NO CONTEXTO CLIMÁTICO DE BRASÍLIA

Rejane Viegas (1); Ana Carolina Cordeiro (2); Isabela Damasceno (3); Maria Eduarda Almada (4); Deborah Fassini (5); Giovanna Salles (6); Mateus Correia (7); Caio Frederico e Silva (8)
(1) Doutoranda em Arquitetura, Arquiteta, rejanemviegas@gmail.com, Universidade de Brasília, UnB
(2) Graduanda em Arquitetura e Urbanismo, 170098702@aluno.unb.br, UnB
(3) Graduanda em Arquitetura e Urbanismo, isabeladamasceno@aluno.unb.br, UnB
(4) Graduanda de Arquitetura e Urbanismo, eduarda.almada.fau@gmail.com, UnB
(5) Graduanda em Engenharia Civil, fassini98@gmail.com, UnB
(6) Graduanda em Arquitetura e Urbanismo, giisallesc3@gmail.com, Centro Universitário de Brasília
(7) Engenheiro Aeroespacial, mateus.fc.engineering@gmail.com, ASHRAE Student Branch
(8) Professor do PPG FAU UnB, Doutor em Arquitetura e Urbanismo, caiosilva@unb.br, UnB

RESUMO
A ventilação natural e o condicionamento artificial de ambientes são estratégias comumente utilizadas para promover conforto e salubridade em ambientes escolares. Salas de aula são ambientes que demandam concentração e atenção plena, e o conforto térmico deve ser um aliado para proporcionar maior sensação de satisfação e bem-estar, o que influencia de forma direta na produtividade dos estudantes. Neste sentido, foi realizado um estudo de campo para avaliar o conforto térmico de salas de aula da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília (FAU-UnB), Distrito Federal (DF), com ventilação natural e condicionamento de ar artificial, a fim de determinar quantas horas de conforto estes ambientes proporcionam ao longo de um ano. Para isso, as salas de aula foram monitoradas em duas épocas do ano distintas por um período de dez dias cada, uma no mês de setembro de 2020, caracterizado como quente-seco, e a segunda no mês de fevereiro de 2021, caracterizado como quente-úmido. Após o levantamento *in loco* das variáveis ambientais internas por aparelhos de medição específicos, foram feitas simulações computacionais no software *Design Builder* versão 5.4.0.21, 2018. Com os dados obtidos pelas simulações, foi calculada uma porcentagem de horas de conforto de cada sala em conformidade com os critérios de aceitabilidade da norma ASHRAE 55. A sala ventilada naturalmente proporciona conforto térmico em 84,25% das horas, e as restantes, desconforto por calor. Já a sala condicionada artificialmente, proporciona conforto térmico em 100% das horas, mas apresenta uma renovação de ar insuficiente para a garantia de salubridade ambiental.

Palavras-chave: ventilação natural, ar condicionado, conforto térmico, ASHRAE 55, simulação computacional

ABSTRACT
Natural ventilation and artificial air conditioning are strategies commonly used to provide thermal comfort and healthiness. Classrooms are spaces in which the activities performed demand concentration and focus, and thermal comfort should be an ally to deliver a greater feeling of satisfaction and wellbeing, which directly influences the student's productivity. Considering these issues, a field study was carried out to evaluate the thermal comfort of classrooms at the Faculty of Architecture and Urbanism of the University of Brasilia, Federal District, one naturally ventilated and the other artificially conditioned, in order to determine how many hours of comfort these spaces have over a period of one year. For this purpose, these classrooms were monitored during two different seasons of the year for a period of ten days each, one in September 2020, characterized as hot and dry, and the second in the month of February 2021, characterized as hot and humid. After the on-site survey of the internal thermal variables collected by the specific measuring devices, computer simulations were made using the Design Builder software version 5.4.0.21 2018. Based on the data obtained from the simulations, a percentage of hours of comfort in each classroom was calculated in compliance with the acceptability criteria of ASHRAE 55. The naturally ventilated classroom provides thermal comfort during 84,25% of the hours measured, and the remaining hours are discomfort hours due to heat. On the other hand, the artificially conditioned classroom provides thermal comfort 100% of the time, yet it has insufficient air renewal rates for healthy environment standards.
Keywords: natural ventilation, air conditioning, thermal comfort, ASHRAE 55, computational simulation.

1. INTRODUÇÃO

Para o ser humano se encontrar em estado de conforto térmico, os diversos fatores climáticos que influenciam o indivíduo dentro de uma zona, devem refletir uma sensação de satisfação. Para tanto, normas e métodos mensuram e definem parâmetros ideais em busca do bem-estar térmico. Entretanto, esses parâmetros sofrem alterações conforme o local que são aplicados (KWOK,1998), principalmente em ambientes com alta densidade de indivíduos.

Neste sentido, a ASHRAE 55 (2020) é uma das normas que tem o propósito de especificar o real estado de conforto térmico do indivíduo e indicar condições ambientais ideais para atingi-lo. Esta norma é aplicável apenas para ambientes internos destinados à ocupação humana, é uma norma que leva em consideração tanto os fatores ambientais (temperatura do ar, temperatura radiante, velocidade do vento e umidade relativa do ar) quanto humanos (atividade e vestuário) para determinar o que é conforto térmico, implicando em uma análise completa de toda a situação. Além da preocupação com o conforto térmico, há também uma preocupação ambiental e energética. Assim, a decisão do tipo de sistema utilizado para alcançar a sensação térmica satisfatória é de vital importância, afinal, o uso de sistemas de ventilação natural pode reduzir os custos energéticos para mais de 50% (DE ABREU-HARBICH; CHAVES; BRANDSTETTER, 2018), além de proporcionar, em alguns casos, o conforto térmico.

A fim de analisar as condições de conforto térmico vigentes de um ambiente de uma maneira precisa, as simulações computacionais são de suma importância, devido à capacidade de calcular as complexas relações entre arquitetura da construção, o ambiente externo e os sistemas da edificação, desde que o modelo numérico esteja calibrado com medições *in loco* (NETO, 2016). Tais cálculos podem proporcionar ao projetista/pesquisador, o desempenho da envoltória e dos sistemas de condicionamento artificial, as cargas de resfriamento e aquecimento, e o consumo energético (TRINDADE; PEDRINI; DUARTE, 2010).

Damasceno e Silva (2019) analisam dados de conforto térmico de uma escola localizada em Brasília. Nesta pesquisa, alguns dados coletados por meio de entrevistas foram comparados aos dados obtidos por meio de simulações computacionais, para a obtenção do índice de Temperatura Fisiológica Equivalente (PET). De acordo com as respostas, 91% dos alunos sentiam calor em algum grau, apenas 9% sentiam-se confortáveis. Este estudo revela a necessidade da promoção de conforto térmico para o clima de Brasília.

Neste sentido, conhecer o real impacto do clima no conforto térmico é fundamental pois viabilizam melhores decisões tanto em etapas projetuais quanto em processos de adequação de edificações já habitadas. Cada ambiente deve ter condições mínimas de conforto, que por sua vez dependem das atividades a serem exercidas no mesmo, como exemplo, salas de aula necessitam de condições que garantam rendimento e conforto dos alunos (VIRGÍNIA, 2016), pois podem acarretar diversos sintomas negativos, como dificuldade de concentração e memória (MENDEL, 2005), o que corrobora com a pesquisa de Zomorodian, Tahsildoost e Hafezi (2016), onde relatam que um ambiente térmico satisfatório influencia positivamente no desempenho e aprendizado de alunos.

No contexto da pandemia, momento em que foi realizado este estudo, todas as atividades presenciais da Universidade de Brasília foram totalmente interrompidas, e, visando contribuir para com o Plano de Contingência da Universidade para a eventual reabertura, o grupo da ASHRAE *Student Branch* de Brasília desenvolveu a tradução do Guia para reabertura de escolas e universidades: ASHRAE *Epidemic Task Force* (ASHRAE, 2020).

2. OBJETIVO

O objetivo geral deste artigo é avaliar o conforto térmico anual de salas de aula universitárias com ventilação natural e condicionamento de ar artificial, revelando a porcentagem de horas de conforto nessas salas.

3. MÉTODO

O método utilizado nesta pesquisa compreende o levantamento *in loco* de medições das variáveis microclimáticas e simulação no *software Design Builder*, com análise estatística comparativa dos dados obtidos. As análises foram desenvolvidas em duas salas de aula da FAU UnB (Figura 1).

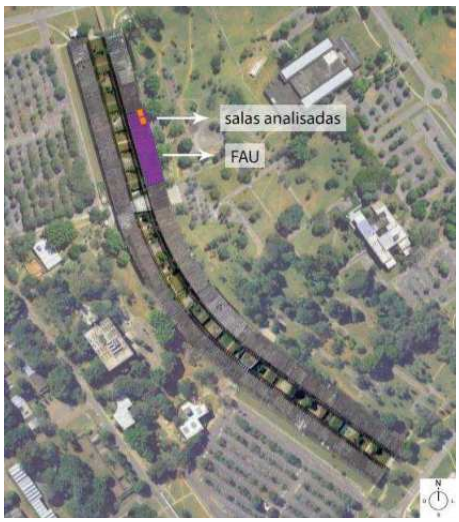


Figura 1 – Localização do estudo: Instituto Central de Ciências (ICC)

3.1. As salas de aula analisadas

As salas de aula estudadas nesta pesquisa (Figura 2) localizam-se na Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU) da Universidade de Brasília (UnB), em Brasília, Distrito Federal. A FAU está localizada no Instituto Central de Ciências (ICC), considerado o principal edifício acadêmico da UnB que abriga a maior parte dos institutos, faculdades, salas de aula, anfiteatros e laboratórios da universidade. A escolha dessas duas salas foi feita com o intuito de identificar ambientes em que se podem experimentar desconforto por calor, a primeira ventilada naturalmente (VN) e outra condicionada artificialmente (AC). Essas expectativas iniciais foram criadas a partir da localização e configuração de cada um dos ambientes, já que, enquanto a VN é propensa a um acúmulo térmico (devido a sua orientação solar e configuração espacial), a AC apresenta uma dificuldade de acúmulo de calor (devido à grande inércia térmica do solo circundante, em contraponto, a sala não possui aberturas, somente a porta de entrada de 0,80 m, o que também poderia apresentar desconforto por calor.

As medições nas salas ocorreram sem a presença de aluno e professores, devido à pandemia da COVID-19, porém, durante as medições, seus equipamentos de ventilação permaneceram ligados. A primeira analisada foi a sala ventilada naturalmente que se localiza no térreo, feita em concreto armado em contato com a cobertura e o subsolo, com 74,34 m² e voltada para noroeste. Possui aberturas basculantes na parede voltada para o pátio interno da edificação e durante a medição os ventiladores permaneceram ligados. A segunda sala de aula analisada se encontra no subsolo da FAU, em contato com o solo e sem aberturas, com condicionamento de ar. Possui 57,33 m², também voltada para noroeste e sistema construtivo em concreto armado. Para a medição da sala, o ar condicionado foi ligado durante todo o tempo para comparação com as medições da sala naturalmente ventilada.

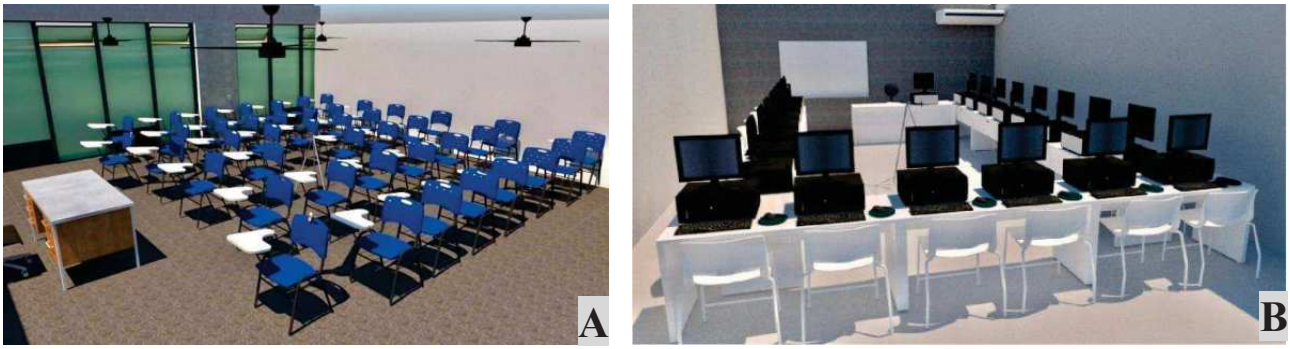


Figura 2 - Salas de aula de aplicação das medições: (A) com ventilação natural; (B) com condicionamento de ar (Autores, 2021)

De acordo com a NBR 15220, Brasília se localiza na zona bioclimática 4, com clima tropical de altitude, podendo ser dividido em duas épocas marcantes, o período quente-seco, inverno seco começando por volta de maio e indo até setembro; e o período quente-úmido, verão chuvoso começando em outubro e indo até abril. As medições ocorreram em duas épocas distintas do ano: a primeira em setembro, do dia 22/09/2020 a 01/10/2020, sendo o mês mais quente do ano em Brasília, e a segunda em fevereiro, do dia 22/02/2021 a 01/03/2021, durante a curta época de chuvas.

3.2. Medições das variáveis microclimáticas

As variáveis ambientais internas coletadas foram: temperatura do ar, temperatura radiante média, umidade relativa do ar e velocidade do ar. Os equipamentos utilizados foram: Confortímetro SENSU, *Data Logger* HT-810, HOBO MX1102A *Data Logger*, Termo-Higro Decibelímetro luxímetro THDL-400, HOBO MX2300 *Data Logger*, HOBO MX CO2 *Logger* e Termo-Higro-Anemômetro Luxímetro THAL-300. Os ambientes medidos eram homogêneos, sendo os equipamentos de medição de temperatura e umidade instalados a uma altura de 1,20 m do piso (ISO 7726, 1998).

Logo, foi feita uma distribuição uniforme dos aparelhos de medição (Figuras 5 e 6) de temperatura nas paredes das salas (Figura 3) juntamente com os medidores de umidade relativa do ar em paredes opostas e os medidores de temperatura radiante média e velocidade do ar (Figura 4) foram colocados centralizados na sala, também a altura de 1,20 m.



Figura 3 – Medidor temperatura do ar - setembro de 2020 (Autores, 2021)

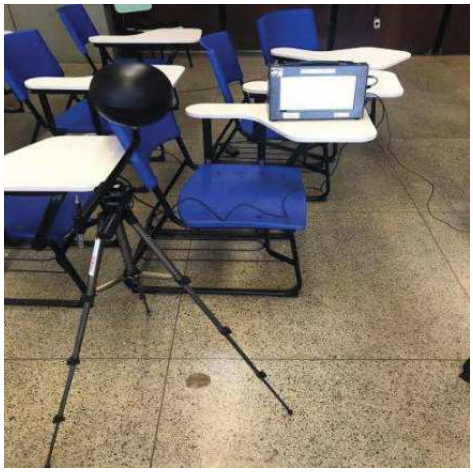


Figura 4 - Medidor temp. radiante média e velocidade do ar - fevereiro de 2021 (Autores, 2020)

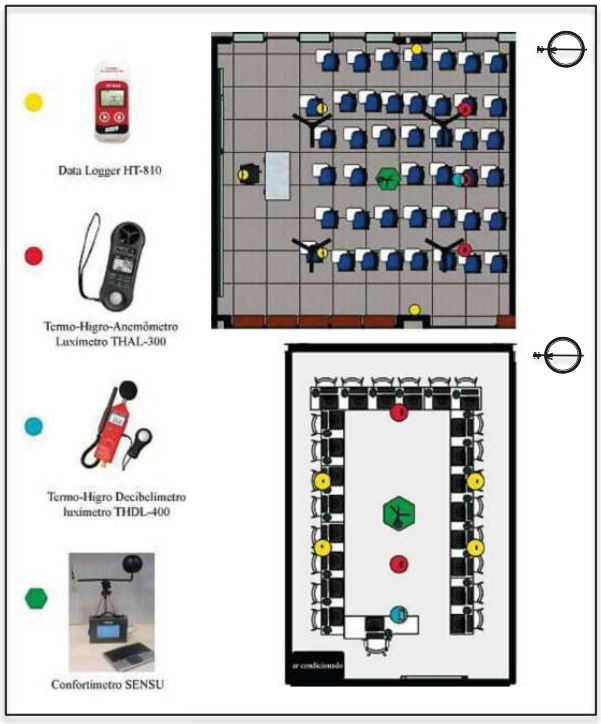


Figura 5 - Mapeamento e identificação dos aparelhos nas salas setembro de 2020 (Autores, 2021)

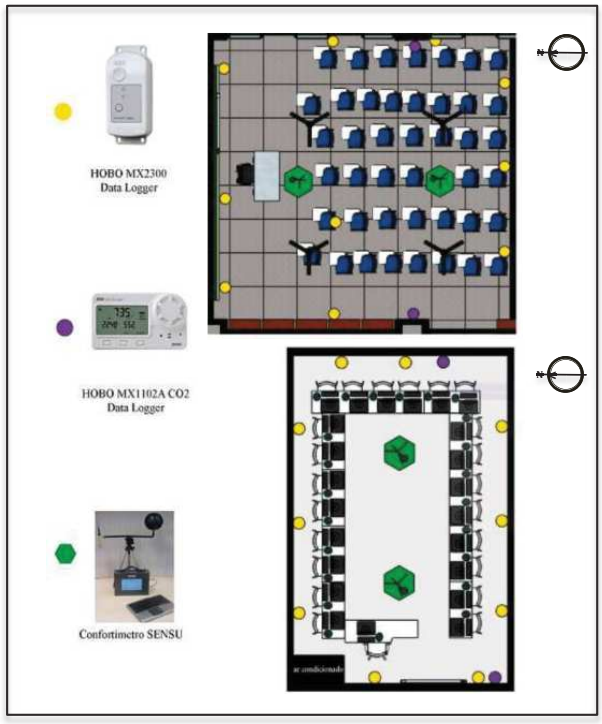


Figura 6 - Mapeamento e identificação dos aparelhos nas salas fevereiro de 2021 (Autores, 2020)

3.3. Simulação no *Design Builder*

O *software* de simulação utilizado foi o *Design Builder* versão 5.4.0.21 2018. Inicialmente, criou-se um modelo dos dois ambientes a serem simulados. Para isso, foram utilizadas informações de levantamentos anteriores da FAU-UnB que detalharam as dimensões dos espaços, bem como fotografias dos ambientes para caracterizar cada material de vedação das salas, de modo a criar uma representação real das salas. Além disso, o uso dos ambientes foi caracterizado: sala 05 como sala de aula ventilada naturalmente (VN) e o Laboratório Ensino em Projeto de Arquitetura Assistido por Computador (LEPAC), laboratório de informática onde há aulas, como sala de aula condicionada artificialmente (AC).

Após a modelagem, fez-se necessária a criação de dois arquivos climáticos em formato. epw: um do ano de 2020 e outro de 2021 (até o mês de março), para que os dados utilizados fossem comparados aos obtidos na etapa 3.2. Para tanto, utilizou-se dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), coletados na estação automática oficial e disponibilizados publicamente em formato .cvs. Esses dados ao serem aplicados no software *Elements* (versão 1.0.6), foram transformados em um arquivo.epw, compatível com o *Design Builder.* Com o modelo e os arquivos climáticos prontos, foram realizadas as simulações. Os dados de saída foram necessários para o cálculo das horas de conforto de acordo com a norma ASHRAE (2020) e os dados necessários para a comparação com a medição:

- Ventilação (mecânica e natural) (ac/h);
- Ventilação externa (kW);
- Ocupação (kW);
- Ganho térmico das máquinas (computadores) (kW);
- Ganho térmico solar (kW);
- Temperatura do ar (°C);
- Temperatura radiante (°C);
- Temperatura operativa (°C);
- Temperatura externa de bulbo seco (°C);
- Velocidade do ar (m/s);
- Umidade relativa do ar (%).

Tabela 1: Dias e horários das simulações

		Dias simulados	**Horário das simulações**	**Frequência de geração dos dados**
Simulação sala VN	1	Todos os dias de 2020	12:00 às 16:00	Hora em hora
	2	22/09/20, 23/09/20, 24/09/20 e 26/09/20	12:00 às 16:00	5 em 5 minutos
	3	22/02/21 à 25/02/21	12:00 às 16:00	5 em 5 minutos
Simulação sala AC	1	Todos os dias de 2020	12:00 às 16:00	Hora em hora
	2	28/09/20 à 01/10/20	12:00 às 16:00	5 em 5 minutos
	3	26/02/21 à 01/03/21	12:00 às 16:00	5 em 5 minutos

No total, foram realizadas seis simulações: três da sala VN e três da sala AC (Tabela 1). As datas escolhidas para as simulações correspondem aos dias em que as medições foram feitas em cada sala, já o período diário escolhido (12h às 16h) se deu pelo fato de esse ser o horário mais quente do dia em clima tropical (VIEGAS, 2017). Feitas as simulações, exportou-se os dados obtidos em formato .csv, para posterior análise. Com intuito de desenvolver uma melhor análise, os resultados obtidos nas simulações foram expostos a gráficos adaptados por Sudbrack (2017), e posteriormente inseridas nos gráficos na qual tem o objetivo de calcular a porcentagem de horas de conforto a partir das equações de limite de aceitabilidade indicadas na norma ASHRAE 55 (2020). Indicando quantas a porcentagem final de desconforto por calor e por frio.

4. RESULTADOS

Com os resultados das medições e consequentes simulações, foi possível determinar as horas de conforto de acordo com a ASHRAE 55 (2020) de cada sala.

4.1. Sala ventiladas naturalmente (VN)

Ao comparar a temperatura medida (Tm) com a temperatura operativa simulada (Ts), observou-se que a maior diferença entre os valores de Tm e Ts foi de 15%, no dia 24/02/2021 e no dia 23/09/2021, houve a menor diferença (Figura 7). Assim, podemos considerar a simulação fidedigna às condições reais do ambiente, o que permite as análises feitas a seguir. Além disso, pode-se observar que a temperatura varia pouco ao longo do ano, se mantendo sempre na faixa de 25 °C. Ao aplicar os dados simulados ao gráfico (Figura 8), percebeu-se que a sala se comporta como esperado inicialmente: há apenas desconforto por calor 15, 75% do total de horas totais anuais. Além disso, ao observar o resultado de hora em hora da simulação, nota-se que as principais horas de desconforto são 15:00 e 16:00, o que corrobora a teoria de que a incidência solar é a principal causa de desconforto térmico para a sala de aula.

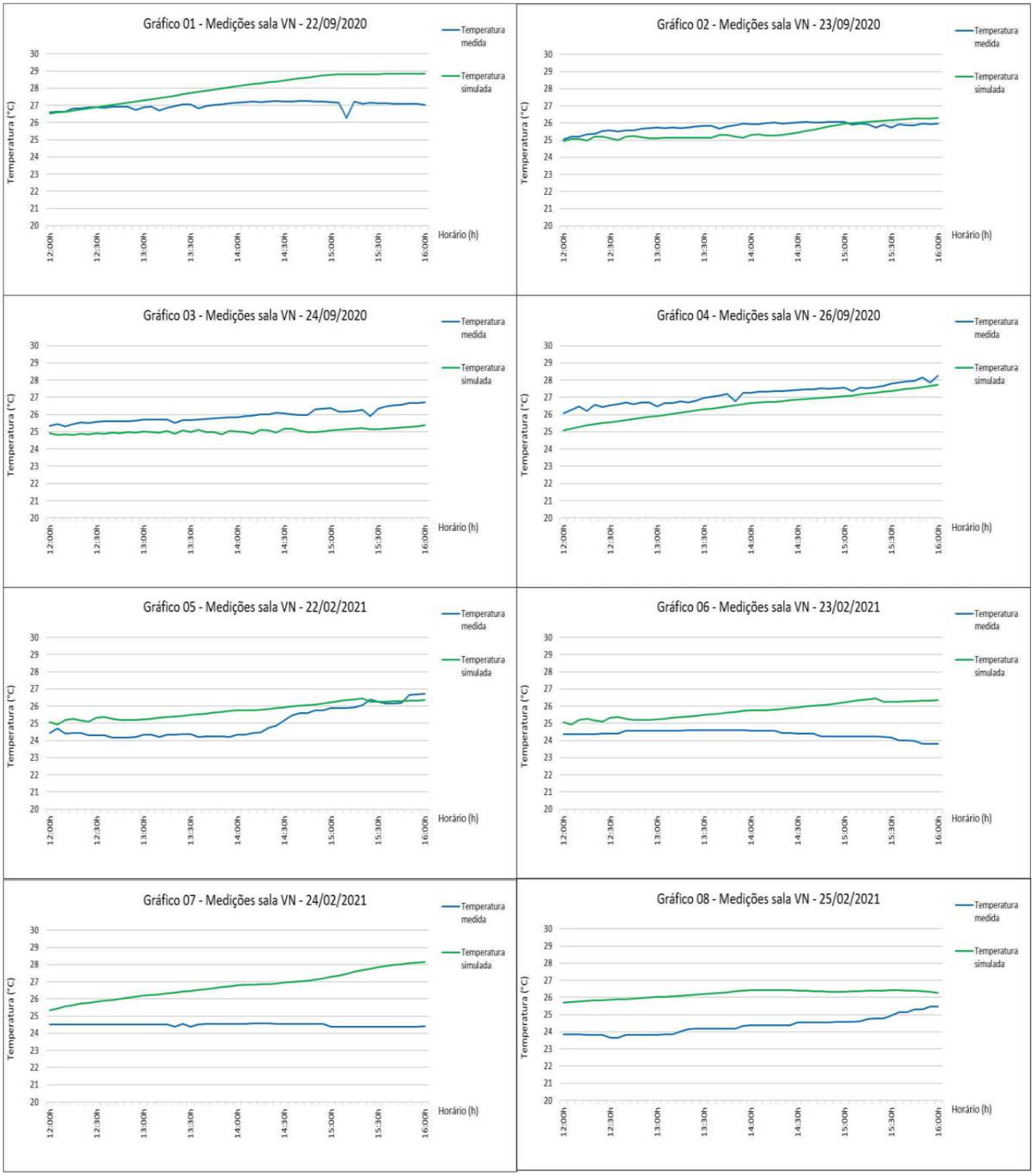


Figura 7 - Comparação de Tm e Ts da VN para validação da simulação

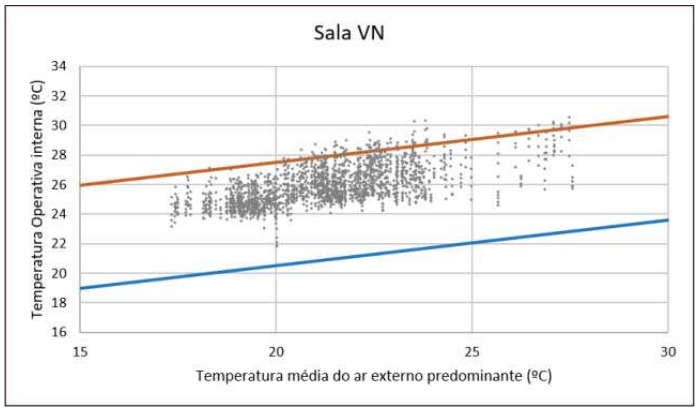


Figura 8: Resultado das horas de conforto (VN) adaptado de Sudbrack (2017)

4.2. Salas com condicionamento de ar (AC)

Comparando a temperatura registrada durante as medições (Tm) e a temperatura operativa resultante das simulações (Ts), observou-se que, para esse ambiente, o maior erro foi de 13% no dia 01/10/2020, como pode ser observado nos gráficos (Figura 9). Isso indica que esta simulação também pode ser considerada fiel ao ambiente existente, de modo a ser uma referência confiável para análises. Essa sala também se mantém em uma faixa constante ao longo do ano, variando entre 23 °C e 25 °C. Aplicando os dados simulados ao gráfico (Figura 10), obteve-se um resultado inesperado: a sala é confortável durante todas as horas do ano. Isso provavelmente acontece pelo fato do laboratório estar no subsolo e ser um ambiente condicionado.

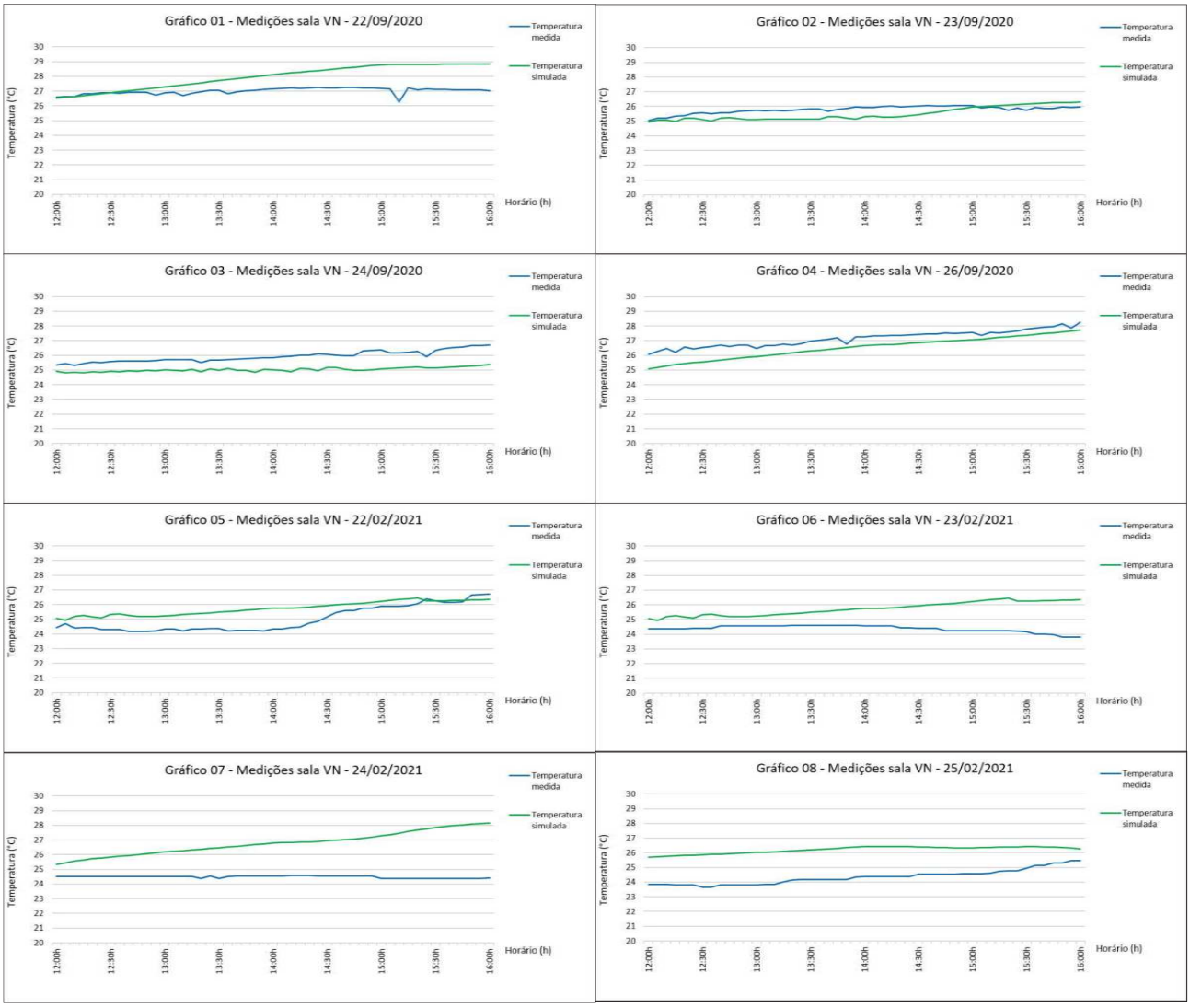


Figura 9 - Comparação de Tm e Ts da AC para validação da simulação

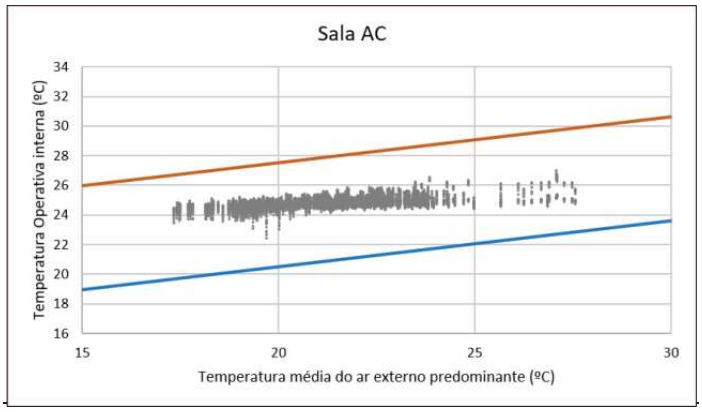


Figura 10: Resultado das horas de conforto (AC) adaptado de Sudbrack (2017)

5.CONCLUSÕES

Mediante a análise dos resultados obtidos por meio das medições *in loco* e simulação computacional, a partir das variáveis microclimáticas dos ambientes das salas de aula, foi possível determinar a quantidade de horas de conforto das salas no período de um ano, de acordo com o critério de 80% de aceitabilidade da norma ASHRAE 55.

A sala ventilada naturalmente (VN) proporciona conforto térmico em 84,25% das horas, em concordância com a faixa de conforto do modelo adaptativo da ASHRAE 55, sendo que a porcentagem de horas de desconforto (15,75%) é apenas por calor, ocasionadas pelo acúmulo térmico em decorrência da constante incidência solar no período da tarde. Já a sala condicionada artificialmente (AC), apresentou temperaturas confortáveis durante todas as horas analisadas, uma consequência direta de sua localização no subsolo da universidade, bem como o controle constante da temperatura por meio do ar condicionado. A partir das análises, conclui-se que, ao projetar um ambiente, deve-se levar em consideração como sua orientação solar pode influenciar o conforto interno, para que assim seja possível incluir diretrizes de projeto que mitiguem os possíveis desconfortos dos usuários, como uma configuração de aberturas que proporcione uma ventilação cruzada ou a implementação de brises na fachada mais problemática.

Por fim, esta pesquisa contribui para a base de avaliação das condições internas de conforto térmico de sala de aula onde os resultados deste estudo podem ser aplicados em edificações escolares com características semelhantes às condições climáticas da região de Brasília, visto que garantir um ambiente térmico satisfatório influencia positivamente no desempenho e aprendizado de alunos.

Para pesquisas futuras, recomenda-se uma análise de um período maior do dia, englobando tanto a manhã quanto a noite, para se ter uma compreensão mais completa do comportamento térmico desses ambientes. Além disso, seria enriquecedor à pesquisa considerar a percepção de conforto a partir do usuário determinando o índice PET das horas simuladas da parte externa, já que, o microclima externo tem relação direta à sensação de conforto do usuário.

REFERÊNCIAS

ASHRAE Standard 55. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.** American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, 2020.

ASHRAE - SOCIEDADE AMERICANA DE ENGENHEIROS DE AQUECIMENTO, R. E A. C. **Guia para reabertura de escolas e universidades : ASHRAE Epidemic Task Force**. American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, 2020. (ISBN: 78-65-992384-0-6). Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/344299180_Guia_para_reabertura_de_escolas_e_universidades_ASHRAE_Epidemic_Task_Force. Acesso em 28/06/2021.

BARRETO, L. **Traço do Arquiteto no Campus Darcy Ribeiro.** UnB Notícias, Brasília. Dez/2012. Disponível em: http://www.noticias.unb.br/76-institucional/3468-traco-do-arquiteto-no-campus-darcy-ribeiro.

BRAGA, D.K.; AMORIM, C. N. **Conforto Térmico em Edifícios Residenciais do Plano Piloto de Brasília.** X encontro nacional de tecnologia do ambiente construído, 18-21 julho, São Paulo, 2004.

DAMASCENO, Isabela Costa e SILVA, Caio Frederico e. **A Construção do índice PET para Brasília. Estudo de Caso em São Sebastião – DF.** Congresso de Iniciação Científica. Brasília, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/336653436_A_CONSTRUCAO_DO_INDICE_PET_PARA_BRASILIA_-_ESTUDO_DE_CASO_EM_SAO_SEBASTIAO_-DF. Acesso em 28/06/2021.

DE ABREU-HARBICH, L.V., CHAVES, V.L.A., BRANDSTETTER, M.C.G.O. **Evaluation of strategies that improve the thermal comfort and energy saving of a classroom of an institutional building in a tropical climate.** Building and Environment, v. 135, p. 257-268, 2018.

ISO 7726 - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - **Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities**, 1998.

KWOK, G. **Thermal comfort in tropical classrooms.** TRANSACTIONS-AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS, v. 104, p. 1031-1050, 1998.

MENDELL, M. J.; HEATH, G. A. **Do indoor pollutants and thermal conditions in school's influence student performance? A critical review of the literature.** Indoor air, v. 15, n. 1, p. 27-52, 2005.

NETO, P.C.A. et al. **Application of calibration's simplified methodology at computer simulation models in the CWA climate context.** 3rd Conference of International Building Performance Simulation Association, Asia, Sep., 2016.

SUDBRACK, L. O. **Caso zero: Diretrizes de projeto para casas pré-fabricadas de balanço energético nulo em Brasília.** 2017. 242f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2017.

TRINDADE, S. C; PEDRINI, A; DUARTE, R. N. C. **Métodos de aplicação da simulação computacional em edifícios naturalmente ventilados no clima quente e úmido.** Ambiente Construído, v. 10, n. 4, p. 37-58, 2010.

VIEGAS, R. M. **Aceitabilidade e preferência térmica em praças de alimentação de hipermercados em região de clima tropical úmido.** 2017. 117f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2017.

VIRGÍNIA, S. O. C. et al. **Avaliação do conforto térmico em uma sala de aula.** XXXVI Encontro nacional de engenharia de produção. João Pessoa, 2016.

SILVA, W. C. et al. **Simulação das condições térmicas de prédio escolar em Belo Horizonte (MG)**. XVIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ENTAC 2020, 2020.

AGRADECIMENTOS

À ASHRAE Student Branch Brasília.
Ao grupo de pesquisa SiCAC (Simulação Computacional no Ambiente Construído) e LaSUS (Laboratório de Sustentabilidade Aplicado à Arquitetura e ao Urbanismo) pelo empréstimo dos equipamentos necessários e apoio durante o levantamento.
À FAU-UnB pela disponibilização das salas para realização das medições.