

# AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE AMBIENTE ESCOLAR PADRONIZADO, EM CONTEXTO CLIMÁTICO BRASILEIRO, POR MEIO DE SIMULAÇÃO TERMOENERGÉTICA

*THERMAL PERFORMANCE EVALUATION OF A STANDARDIZED SCHOOL BUILDING, IN A BRAZILIAN CLIMATE CONTEXT, USING BUILDING PERFORMANCE SIMULATION*

 Adriano Felipe Oliveira Lopes<sup>1</sup>

 Caio Frederico e Silva<sup>2</sup>

 Cláudia Naves David Amorim<sup>3</sup>

 Juliana Oliveira Batista<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Instituto Federal da Bahia, Eunápolis, BA, Brasil, [adriano.lopes@ifba.edu.br](mailto:adriano.lopes@ifba.edu.br)

<sup>2</sup> Universidade de Brasília, DF, Brasil, [caiofreds@unb.br](mailto:caiofreds@unb.br)

<sup>3</sup> Universidade de Brasília, DF, Brasil, [clamorim@unb.br](mailto:clamorim@unb.br)

<sup>4</sup> Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, Brasil, [juliana.batista@fau.ufal.br](mailto:juliana.batista@fau.ufal.br)

## Resumo

Esse artigo propõe avaliar, por meio de simulação termoenergética, o desempenho térmico por meio do índice de conforto térmico adaptativo do projeto padrão de escola desenvolvido pelo Fundação Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE) em busca de melhor adequá-lo a diferentes contextos climáticos brasileiros. O método empregado é dividido em três etapas e consiste no desenvolvimento de modelo termoenergético, diagnóstico do percentual de horas ocupadas em conforto (POC) e análise estatística para verificação da sensibilidade de variáveis de projeto sobre o POC em climas distintos. Para o desenvolvimento do modelo utilizou-se o software Designbuilder (versão 6.1.3), interface gráfica do algoritmo de cálculo Energyplus (versão 8.9.0), considerando sua implantação em seis cidades: Brasília (DF), Curitiba (PR), Cuiabá (MT), Natal (RN), Porto Alegre (RS) e Rio de Janeiro (RJ). Adotou-se a variável temperatura neutra ( $T_n$ ), em conformidade com as normas ASHRAE 55 e NBR 16401, para delimitação do intervalo de conforto para o cálculo do POC. Por último, verificou-se a influência de nove diferentes variáveis de projeto a partir da análise dos coeficientes de regressão padronizado (SRC), determinação ( $R^2$ ) e probabilidade (p-value). Os resultados indicaram limitações à utilização do mesmo projeto padrão sobretudo para os climas de Cuiabá e Natal, onde o POC apresentou valores inferiores a 30%. Além disso, foi possível observar que as variáveis de maior influência estão associadas à ocupação e transmitância de paredes e coberturas tornando possível identificar padrões de uso e recomendar soluções para as envoltórias mais adequadas a cada contexto climático por meio de diagrama sintético.

**Palavras-chave:** simulação termoenergética, projeto padrão, arquitetura escolar, análise de sensibilidade, EnergyPlus.

## Contribuição dos autores:

**AFOL:** conceituação, curadoria dos dados, análise formal, investigação, metodologia, administração de projeto, programas, validação, visualização, escrita - rascunho original, escrita - revisão e edição. **CFS:** conceituação, aquisição de financiamento, metodologia, administração de projeto, supervisão, validação, escrita - revisão e edição. **CNDA:** metodologia, supervisão, validação, visualização. **JOB:** metodologia, supervisão, validação, visualização.

**Fomento:** Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

**Declaração de conflito:** nada foi declarado.

Editora Responsável:  
Michele Marta Rossi 

## Abstract

*This paper aims to evaluate the adaptive thermal comfort of a standard school building developed by the National Foundation of Education Development (FNDE) to improve its performance in distinct weather contexts in Brazil, using building performance simulation (BPS). The adopted method is divided into three stages: the development of the BPS model, comfort diagnosis based on the occupied comfort hours ratio (POC) and sensitivity analysis of design variables on the POC in different climates. The modeling stage was developed using the software Designbuilder (v. 6.1.3), the graphical interface of Energyplus (v. 8.3), considering its implementation in the following cities: Brasília (DF), Curitiba (PR), Cuiabá (MT), Natal (RN), Porto Alegre (RS) and Rio de Janeiro (RJ). The comfort zone for evaluating the POC was defined using the neutral temperature index ( $T_n$ ) by ASHRAE 55 and NBR 16401 standards. Finally, it was verified the influence of nine different design variables through the analysis of the resulting standardized regression coefficients (SRC), determination coefficient ( $R^2$ ) and probability (p-value). The results addressed limitations to using the standard project once; for the climates and Natal, the POC presented values lower than 30%. In addition, it was possible to observe that the parameters of most significant influence are associated with the user occupation and U-values of walls and roofs, making it possible to identify patterns of use and building envelope more appropriate to each climatic context through a synthetic diagram.*

**Keywords:** Thermal and energy simulation. Standard design. School building. Sensitivity analysis. EnergyPlus.

How to cite this article:

LOPES, A. F. O.; SILVA, C. F. e; AMORIM, C. N. D.; BATISTA, J. O. Avaliação do desempenho térmico de ambiente escolar padronizado, em contexto climático brasileiro, por meio de simulação termoenergética. **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 14, p. e023030, 2023. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v14i00.8670652>

Submitted 08.08.2022 – Approved 09.10.2023 – Published 19.12.2023.

e023030-1 | **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 14, p. e023030, 2023, ISSN 1980-6809



## Introdução

A padronização no projeto de arquitetura pode gerar ambientes desfavoráveis uma vez que desconsidera situações locais específicas de clima e sítio (Kowaltowski, 2011). Essa restrição, associada a limites orçamentários (Brito; Brito; Bortolotto; Silva *et al.*, 2019) impacta diretamente no baixo desempenho térmico do edifício, uma vez que as soluções adotadas, de modo geral, são insuficientes para a garantia do conforto de seus ocupantes.

Um adequado nível de conforto térmico é essencial ao melhor desempenho acadêmico em ambientes escolares (Arenhardt; Wander, 2018; Kowaltowski, 2011; Kowaltowski; Deliberador; Pereira, 2011), inclusive devido à sua alta densidade de ocupação. Sendo assim, a adequação de projetos padronizados sob esse enfoque representa quebra de paradigma quanto à reprodutibilidade técnica em direção à uma abordagem bioclimática. Portanto, é essencial que sejam compreendidas as características climáticas locais a fim de propor soluções mais coerentes a seu contexto de implantação (Bittencourt, 2007).

O desenvolvimento de projetos padronizados para instituições como escolas, hospitais e creches é uma prática recorrente em obras públicas, onde busca-se sobretudo atender a objetivos econômicos e racionalidade construtiva. No entanto, Kowaltowski (2011) aponta para a possibilidade de proliferação de falhas em projetos padronizados quando erros inerentes à determinada obra não são corrigidos em pós-ocupação e são transmitidos a implantações futuras.

Para isso, é essencial o conhecimento de uma amostra representativa do parque construído, incluindo o tamanho e número de edifícios, bem como suas características construtivas e de uso e ocupação, com o objetivo de estabelecer diretrizes de projeto a partir de referências documentadas (Crawley, 2019). Assim, é possível estabelecer não somente diretrizes à concepção de projetos visando melhor desempenho, mas também bases à padronização de tipologias específicas.

Desde 2007, o Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE), no âmbito do Plano de Desenvolvimento da Educação (PDE) (Brasil, 2007), fornece padrões arquitetônicos que atendam aos requisitos mínimos a entes federados que não possuam equipe de concepção de projetos especializada para o bom funcionamento de uma edificação escolar (Brito; Brito; Bortolotto; Silva *et al.*, 2019). O desenvolvimento de projetos padronizados faz parte do Plano de Ações Articuladas (PAR/PNE, 2014)<sup>1</sup>, na dimensão de Infraestrutura e recursos pedagógicos, responsável pelo apoio à implantação de 4.997 escolas de ensino fundamental desde 2007.

Segundo Modler, Berleze, Tsutsumi, Lincuzuk *et al.* (2018), projetos escolares padronizados, por basearem-se em modelos unificados para todo o país, desconsideram sua diversidade, seja de ordem sociocultural, econômica ou climática, podendo acarretar prejuízos quanto aos aspectos pedagógicos, de conforto ambiental, funcionais ou técnico construtivos. Questiona-se, portanto, a possibilidade de promoção de conforto térmico em ambientes escolares naturalmente ventilados para os diferentes contextos climáticos brasileiros, a partir de tipologia arquitetônica padronizada.

---

(1) Esse plano apresenta-se em conformidade com as metas 2 e 3 do Plano Nacional de Educação (PNE), sancionado pela Lei N°. 13.005, que trata da universalização do ensino fundamental de 9 (nove) anos para toda a população de 6 (seis) a 14 (quatorze) anos e universalização do atendimento do ensino médio.

Nesse cenário, esse artigo tem por objetivo avaliar o desempenho térmico por meio do índice de conforto térmico adaptativo de em edifício escolar padronizado com o auxílio de simulação termoenergética e análise de sensibilidade. Para tal, considerou-se, como implantação do projeto em questão, seis diferentes municípios brasileiros: Brasília, Cuiabá, Curitiba, Natal, Porto Alegre e Rio de Janeiro, os quais representam 6 zonas bioclimáticas conforme revisão do Zoneamento Bioclimático Brasileiro (Roriz, 2014; Walsch; Cóstola; Labaki, 2023). O objetivo específico do artigo é compreender o grau de influência de nove variáveis de projeto sobre o percentual de horas ocupadas em conforto a fim de subsidiar diretrizes de projeto nos contextos climáticos avaliados.

### *Conforto térmico em ambientes naturalmente ventilados*

Edifícios educacionais representam parcela representativa do parque construído e, conseqüentemente, de consumo (Barbhuiya; Barbhuiya, 2013; Tahsildoost; Zomorodian, 2015) diretamente associado ao condicionamento térmico de salas de aula. Nesse contexto, algumas pesquisas têm se dedicado ao tema sob diferentes condições de implantação (Perillo; Campos; Abreu-Harbich, 2017; Tahsildoost; Zomorodian, 2015).

Com o objetivo de identificar o método mais adequado para avaliação do conforto térmico em ambientes escolares, Perillo, Campos e Abreu-Harbich (2017) mapearam artigos em três bases: Science Direct, Scopus e Engineer Village. Para classificação dos resultados encontrados foram utilizados os critérios de localização e classificação climática, período de medições de campo, variáveis ambientais, estratégias de ventilação e modelos de avaliação de conforto. A revisão sistemática de literatura indicou um escasso número de pesquisas aplicadas em contexto de climas tropicais, além disso, concluiu-se que o modelo racional de conforto térmico de Fanger apresenta frequentemente valores que extrapolam seus limites. Por esta razão é sugerido que se empregue mais de um método de avaliação de conforto, considerando a adaptação do usuário em regiões de clima tropical.

Rackes, Melo e Lamberts (2016) avaliaram o potencial de conforto térmico de um projeto padrão de escola naturalmente ventilada nas cidades de Curitiba (PR), São Paulo (SP) e Salvador (BA). Foram considerados dois cenários variando-se as entradas referentes às frações máximas de abertura das janelas, orientação solar, absorvância das fachadas externas, presença ou não de uma camada reflexiva no ático em cima do teto, massa térmica das paredes e a presença, ou não, de ventilação mecânica para movimentação do ar. Os resultados indicaram a possibilidade de condicionamento estritamente passivo, desde que os componentes construtivos sejam definidos em conformidade com as características climáticas locais, mesmo se tratando de um projeto padronizado.

Peglow; Ritter; Ronca; Pereira *et al.* (2016) investigaram o incremento do número de horas ocupadas em conforto de um projeto padrão de escola municipal de educação infantil (EMEI), implantada no Município de Pelotas (RS), a partir da adoção de diferentes estratégias de projeto. Considerou-se a adoção de isolamento térmico da cobertura, redução da absorvância das superfícies externas, inserção de dispositivo de proteção solar misto e diferentes tipos de vedações verticais. A partir dos dados de saída obtidos foi possível observar um maior desconforto por calor quando adotada vedação em placas de PRFV (polímero reforçado com fibra de vidro), embora apresente maior isolamento térmico, se comparada a uma vedação em alvenaria convencional, devido à sua massa térmica.

Freitas, Lima e Oliveira (2019) empregaram o modelo adaptativo para quantificar o conforto térmico de um bloco de salas de aula não climatizadas de uma unidade do

CEFET, localizado em Belo Horizonte (MG). Por meio de simulação termoenergética baseada em levantamentos *in loco* verificou-se elevados níveis de desconforto. Como solução, foi proposto o uso de dispositivos de sombreamento e uma cobertura de telha sanduíche com enchimento em EPS (poliestireno expandido), o que resultou em uma amortização das temperaturas internas. A pesquisa destaca a importância da adoção de estratégias passivas durante as fases iniciais de projeto para a adequação de edifícios existentes visando melhores condições de conforto corroborando com a redução de seu consumo energético.

#### *Influência de diferentes variáveis sobre o projeto arquitetônico*

Parte das pesquisas envolvendo simulações computacionais baseiam-se em um princípio condicional no qual são analisadas variações da resposta de um sistema caso ocorram perturbações nos parâmetros de entrada definidos por cenários específicos (Hopfe; Hensen, 2011), conceito base da análise de sensibilidade (Saltelli; Ratto; Andres; Campolongo *et al.* 2008; TIAN, 2013; Gagnon; Gosselin; Decker, 2018). Essa abordagem, podendo ser classificada como local ou global, investiga a resposta de uma simulação quanto aos valores extremos dos parâmetros quantitativos analisados ou quanto a mudanças drásticas nos parâmetros qualitativos (Silva; Santos; Ghisi, 2014a, 2020). A análise do tipo local trata apenas um parâmetro específico variado enquanto os demais permanecem fixos, já a análise global é mais complexa, variando-se todos os parâmetros simultaneamente.

O emprego da simulação em pesquisas envolvendo ambientes escolares naturalmente ventilados aponta para a ineficiência de se adotar as mesmas soluções de projeto em diferentes contextos climáticos (Araújo, 2019; Sartori; Silva Filho; Torres, 2021). Nesse sentido, os estudos abordados buscam aferir o desempenho de projetos de escolas ante a diferentes alternativas que possam contribuir à melhoria do conforto térmico. Além disso, a abordagem apresentada por esses estudos considera a análise local de cada variável de projeto, expondo a dificuldade de integração da simulação durante sua concepção.

Em 2018 foi publicada a norma ASHRAE Standard 209-2018 (ASHRAE, 2018) com o propósito de estabelecer procedimentos consistentes para o uso de simulação termoenergética em todas as fases do processo de projeto (Agarwal; Pastore; Andersen, 2019; AIA, 2019; Hensen; Lamberts, 2019; West; Ndiaye, 2019). A ASHRAE 209 define terminologias, procedimentos e requisitos para a simulação em diferentes fases do processo de projeto, incluindo a redução da demanda energética por meio da melhoria do desempenho da envoltória e a adoção de condicionamento passivo do ar interno. Além disso, a norma apresenta ciclos de modelagem, incluindo a modelagem síntese e conceitual, para avaliar o impacto das decisões de projeto no desempenho do edifício.

Silva, Almeida e Ghisi (2016) buscaram compreender, por meio de simulação termoenergética, a influência de diferentes tipos de envoltória sobre o conforto térmico e consumo energético de uma edificação residencial em quatro contextos climáticos diferentes. O objetivo da pesquisa foi orientar a escolha mais adequada de vedações externas para as diferentes condições de exposição, considerando incertezas nos dados de entrada referentes a seu uso e ocupação e a influência dos dados de entrada sobre o comportamento termodinâmico do objeto de estudo.

Segundo Gagnon, Gosselin e Decker (2018), a análise de sensibilidade global pode reduzir o número de amostras necessárias para definição das melhores soluções de projeto possibilitando a verificação em conjunto de um maior grupo de variáveis de

entrada. Os autores basearam-se nos coeficientes de regressão padronizados (SRC), correlação parciais ordenados (PRCC) e índice de segunda ordem de Sobol (tradução livre para “*Sobol second order index*”) para classificação da influência de 30 variáveis de projeto nos dados de saída dos modelos. O estudo foi conduzido em estágios, conforme etapas de projeto, no qual um conjunto de variáveis foi determinado. A partir dos resultados obtidos observou-se a ordem de importância dos parâmetros definidos sobre dados de saída dos modelos utilizados, sua linearidade em função do reconhecimento de padrões e, por último, a relação entre as variáveis estudadas.

## **Método**

A simulação computacional é uma importante ferramenta do desenvolvimento de políticas públicas que busquem mitigar o impacto ambiental e econômico de edifícios melhorando seu desempenho (Crawley; Laerie; Winkekmann; Buhl *et al.*, 2001; Crawley, 2019). O método adotado divide-se em 5 etapas: definição dos municípios de referências para adoção dos arquivos climáticos de simulação; levantamento arquitetônico e caracterização do projeto padrão; configuração do modelo de simulação no DesignBuilder (versão 6.1.3.005)<sup>2</sup>; diagnóstico do percentual de horas ocupadas em conforto (POC) e interpretação dos parâmetros mais influentes aos resultados de POC por meio de análise estatística de sensibilidade.

### *Clima e implantação*

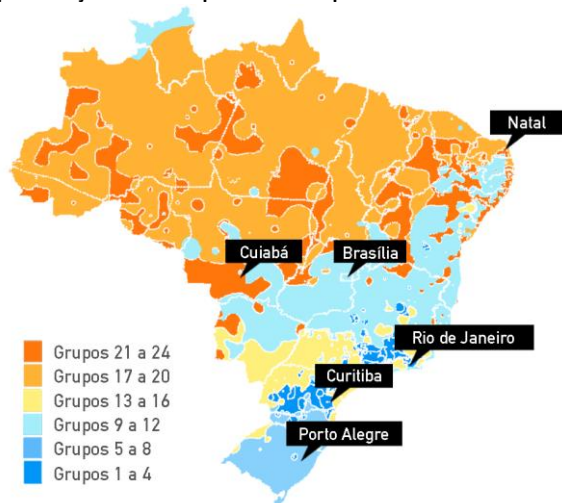
De acordo com a norma vigente que define o Zoneamento Bioclimático Brasileiro (ZBBR), a NBR 15220-3 (ABNT, 2005a), o território nacional está dividido em 8 zonas com características climáticas definidas por três parâmetros principais: médias mensais das temperaturas máximas, médias mensais das temperaturas mínimas e umidade relativa do ar. Desde 2008 essa divisão tem sido questionada, pois existem cidades com distintas características climáticas classificadas na mesma zona, resultando em recomendações inadequadas de princípios bioclimáticos para alguns municípios (Bavaresco; Mazzaferro; Melo; Lamberts, 2017; Bogo, 2016; Ferreira; Souza; Assis, 2017).

Em 2014, Mauricio Roriz (2014) propôs uma nova classificação de climas nacionais. Em revisão ao ZBBR definiu-se, para os municípios brasileiros, uma nova subdivisão em 24 zonas climáticas segundo os parâmetros de: temperatura média anual, desvio padrão da temperatura média, amplitude média anual e desvio padrão de amplitude. Nesse sentido, adotou-se essa classificação definindo-se um recorte em seis municípios - Brasília (DF), Curitiba (PR), Cuiabá (MT), Natal (RN), Porto Alegre (RS) e Rio de Janeiro (RJ) - referentes a seis grupos de zonas bioclimáticas caracterizadas pela variação do desvio da temperatura média, indicados na Figura 1, a fim de representar as principais zonas bioclimáticas que compõem o zoneamento bioclimático brasileiro proposto.

---

(2) Desde a versão 7.0 do software DesignBuilder, diversos métodos de amostragem e uma gama de distribuições probabilísticas foram implementados como parâmetros de entrada de um modelo. O método de Análise de Sensibilidade adotado para o processamento estatístico do modelo é o de regressão. Portanto, qualquer número de variáveis de projeto pode ser incluído para cada uma das variáveis de saída definidas (DesignBuilder, 2019).

Figura 1 – Indicação dos municípios selecionados para análise no contexto da proposta de revisão do ZBBR representado por variação do desvio padrão da temperatura média

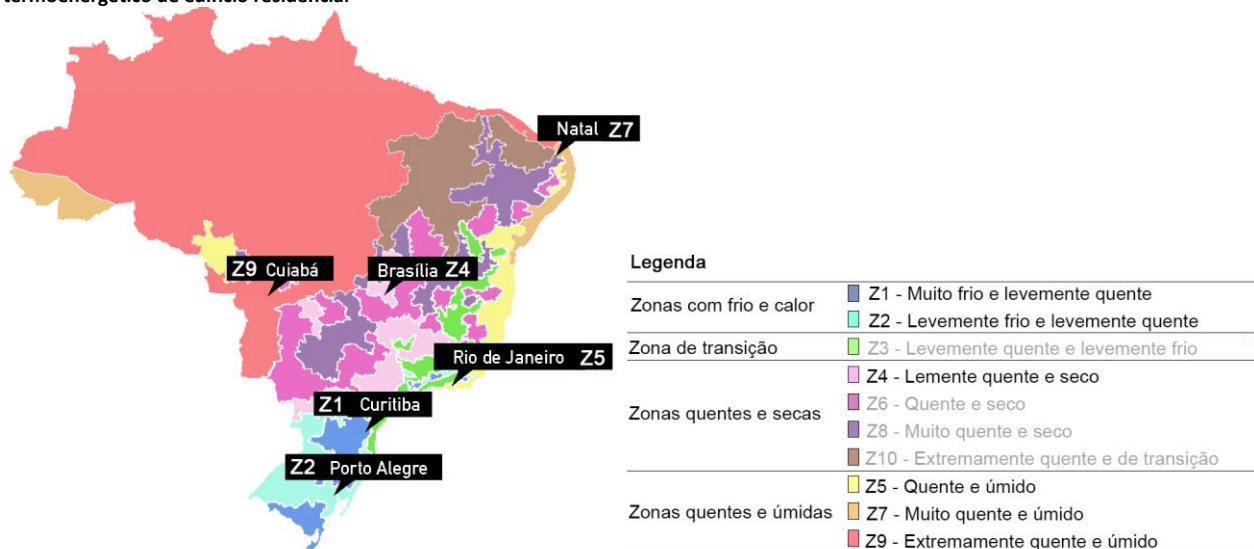


Fonte: adaptado de Roriz (2014).

A adoção desse recorte pautou-se em algumas discussões a respeito do ZBBR, no qual consideravam-se mais subdivisões climáticas em relação a oito zonas bioclimáticas brasileiras, tendo como base a proposta de Roriz (2014), para atualizações e melhorias dos métodos de classificação do nível de eficiência energética brasileiros (Bavaresco; Mazzaferro; Melo; Lamberts, 2017). Além disso, durante o desenvolvimento dessa pesquisa ainda não havia sido publicado o zoneamento climático brasileiro para edificações residenciais proposto por Walsh, Cóstola e Labaki (2023).

O último zoneamento bioclimático proposto foi obtido a partir da simulação do desempenho termoenergético de 50 variações de uma residência térrea isolada, sob 2 modos de operação - com ou sem sistemas ativos de condicionamento térmico - em 298 diferentes localidades ao longo do país, representadas por seus respectivos arquivos climáticos. Definiu-se, portanto, 10 zonas subdivididas entre zonas com frio e calor, de transição, quentes e secas e quentes e úmidas. Diante do exposto, a Figura 2 apresenta a classificação dos seis municípios definidos para aplicação do método sob a ótica do zoneamento proposto.

Figura 2 - Indicação dos municípios selecionados para análise no contexto da proposta de revisão do ZBBR baseado em simulação de desempenho termoenergético de edifício residencial



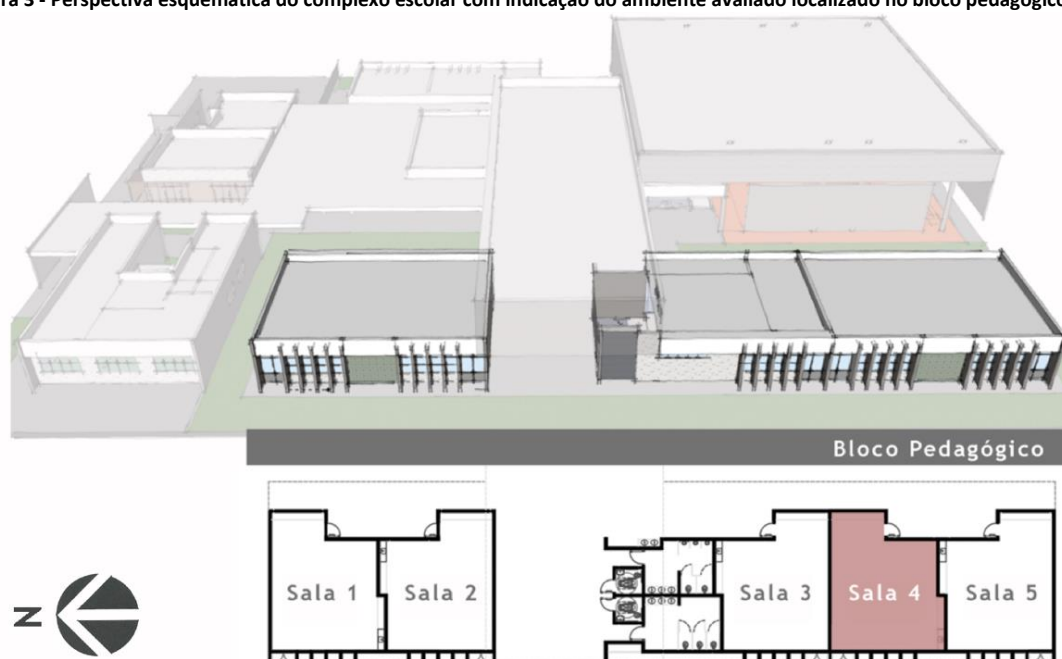
Fonte: adaptado de Walsh, Cóstola e Labaki, (2023).

### Projeto padrão

O projeto padrão de uma unidade de ensino fundamental, utilizado nesta pesquisa, faz parte do banco de projetos desenvolvido pela Coordenação de Desenvolvimento e Infraestrutura (CODIN) do FNDE. Caracteriza-se por blocos térreos de acesso independente com área total de aproximadamente 2.290 m<sup>2</sup> e marcado por um bloco pedagógico principal constituído por 5 salas (Figura 3).

Todas as aberturas posicionadas no perímetro do projeto são sombreadas por placa metálica perfurada distante cerca de 80 centímetros. Os conjuntos funcionais que compõem o projeto do edifício escolar possuem estrutura de concreto, paredes em alvenaria convencional e coberturas em estrutura metálica. Os materiais e acabamentos são padronizados e especificados de acordo com os requisitos de uso, operação e manutenção (Brito; Brito; Bortolotto; Silva *et al.*, 2019).

Figura 3 - Perspectiva esquemática do complexo escolar com indicação do ambiente avaliado localizado no bloco pedagógico



Fonte: os autores.

O tipo de envoltória caracterizada no modelo, tanto para paredes quanto coberturas, é descrito na Figura 4 e provém do catálogo de especificações para projetos padrão do FNDE. Para uma correta representação de suas propriedades térmicas é necessário a inserção dos dados de condutividade, densidade e calor específico, por material, ou a resistência térmica do componente. Para tal utilizou-se como referência a NBR 15220-2 (ABNT, 2005b) e biblioteca de componentes construtivos brasileiros desenvolvida pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) (Weber; Melo; Marinoski; Guths *et al.*, 2017) e, em seguida, registrados os valores de transmitância térmica, calculados no próprio DesignBuilder.

### Modelo de simulação

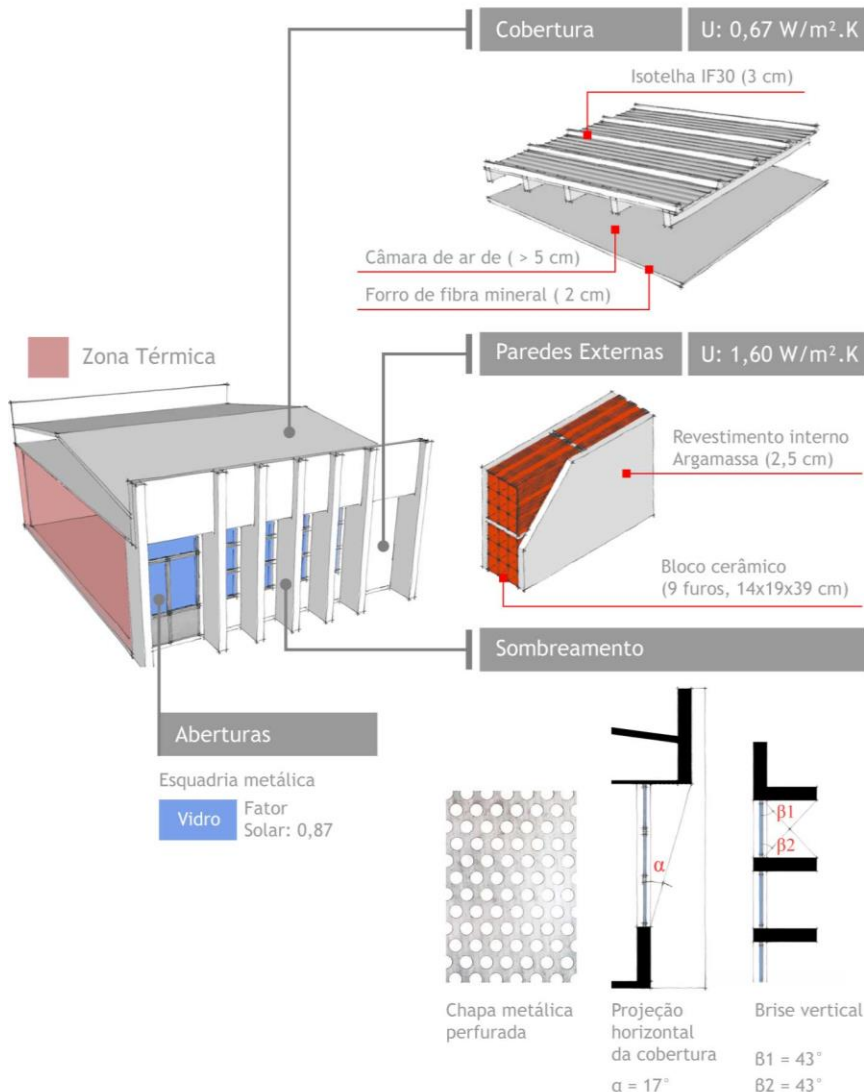
A ferramenta utilizada para elaboração e simulação do modelo termoenergético foi o software DesignBuilder, um dos mais poderosos, versáteis e intuitivos softwares de simulação termoenergética atualmente disponíveis (Jankovic, 2013) e interface gráfica do algoritmo de cálculo EnergyPlus (versão 8.9.0). Nele é possível definir todos os dados

de entrada pertinentes à simulação de um edifício, bem como realizar análises paramétricas, de incertezas e otimizações a partir de um ou mais fatores.

O modelo elaborado seguiu o projeto padrão descrito, com ênfase na zona térmica referente à Sala 04 (Figura 3), respeitando as reais condições de exposição e implantação do bloco pedagógico. Também foram representados seus respectivos ângulos de sombreamento, definidas as características de adjacência entre as superfícies externas e internas, caracterizados os materiais componentes da envoltória e tipo de vidro das aberturas, assim como a densidade de ocupação no interior dessa zona, suas rotinas de ocupação e densidade de potência instalada.

Em reuniões com equipe técnica da CODIN, definiu-se que a ocupação da sala de aula se daria no intervalo das 7h às 19h. A partir desse dado definiu-se uma variação de distribuição do número de ocupantes por sala, como mostrado na Figura 5, e uma densidade de ocupantes em ambientes de sala de aula, de 0,3767 pessoas por m<sup>2</sup>. Esses valores foram extraídos e adaptados dos padrões de uso e ocupação presentes na biblioteca do software os quais tem por referências as normas ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2019) e 189.1 (ASHRAE, 2017a).

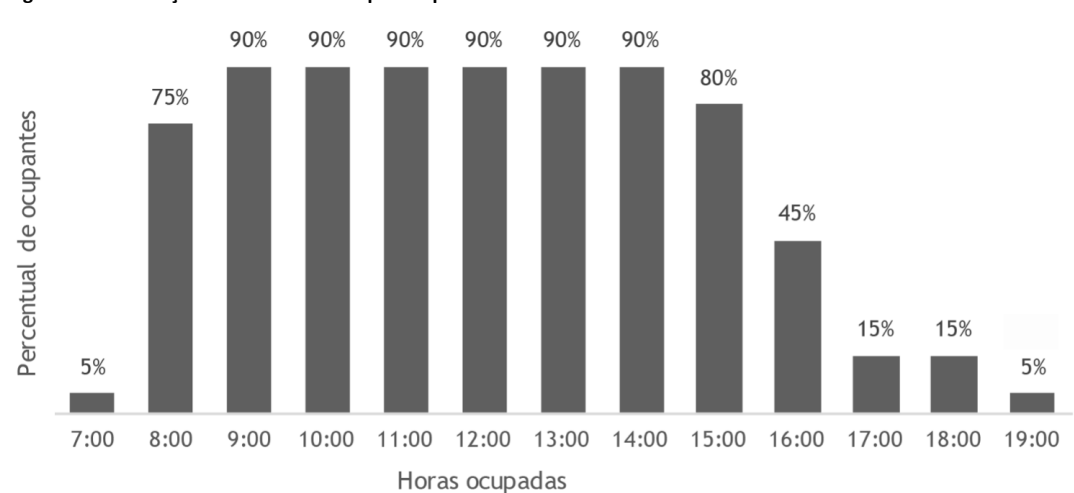
Figura 4 – Características da envoltória e ângulos de sombreamento aplicados ao bloco pedagógico no projeto padrão



Fonte: os autores



Figura 5 - Distribuição do número de ocupantes por sala entre as 7 e as 19 horas



Fonte: os autores.

Para configuração da ventilação natural, o *EnergyPlus* se baseia no algoritmo *Airflow Network* (Gu, 2007; Walton, 1989) definindo, portanto, uma rede de ventilação. Esse algoritmo representa um modelo matemático simples para o cálculo da distribuição do fluxo de ar entre ambientes por meio de equações de conservação de massa, energia e concentração em função de um número aproximações. O modelo representa o fluxo de ar entre zonas térmicas e o exterior considerando a trajetória do ar no interior do ambiente devido diferenças de pressão, e estima com precisão o número de renovações de ar (Srebric, 2019).

Em conformidade com o projeto disponibilizado pela CODIN, foram adotados dois tipos de esquadrias para caracterização da área de abertura do modelo posicionadas em paredes opostas. A abertura Tipo A, com altura de 2,1 m, apresenta duas folhas fixas e uma folha móvel do tipo *maxim-ar*, enquanto a abertura Tipo B, é de correr disposta em fita na fachada posterior do bloco pedagógico, com altura de 80 cm. A fração de abertura das janelas adotada nessa pesquisa foi de 33 %, a partir da qual são calculadas as áreas de entrada e saída do ar.

#### Diagnóstico do Percentual de Horas Ocupadas em Conforto

O cálculo do número de horas ocupadas em conforto adotado utiliza a equação de temperatura neutra definida por De Dear e Brager (1998), adotada pelas normas *ASHRAE Standard 55* (ASHRAE, 2017b) e *NBR 16401-2* (ABNT, 2008). Por meio desse cálculo é possível definir a zona de conforto térmico em função da temperatura média predominante do ar externo, obtida a partir da média aritmética das temperaturas de bulbo seco de não menos que 7 dias ou mais que 20 dias anteriores em relação a um dia de referência. A equação é indicada a seguir:

$$t_{mpa(out)} = 0,34.t_{od-1} + 0,23.t_{od-2} + 0,16.t_{od-3} + 0,11.t_{od-4} + 0,08.t_{od-5} + 0,05.t_{od-6} + 0,03.t_{od-7}$$

Onde:

$t_{mpa(out)}$  é temperatura média do ar externo;

$t_{od-1}$  é temperatura média do dia anterior ao dia de referência;

$t_{od-2}$  é temperatura média de dois dias antes ao dia de referência, e assim por diante;

A ASHRAE 55 estabelece um limite de aceitabilidade de 80% como critério de conformidade. Portanto, para definição da zona de conforto térmico extrapola-se a temperatura neutra calculada em 3,5°C, tanto para calor quanto frio. Dessa forma a avaliação do percentual de horas ocupadas em conforto é determinada pela comparação entre a temperatura operativa extraída dos resultados de simulação para cada hora do ano com a temperatura de conforto calculada. Neste método, os efeitos de desconforto térmico local, roupa, atividade metabólica, umidade e velocidade do ar não devem ser analisados isoladamente, pois já são considerados dentro da zona de conforto.

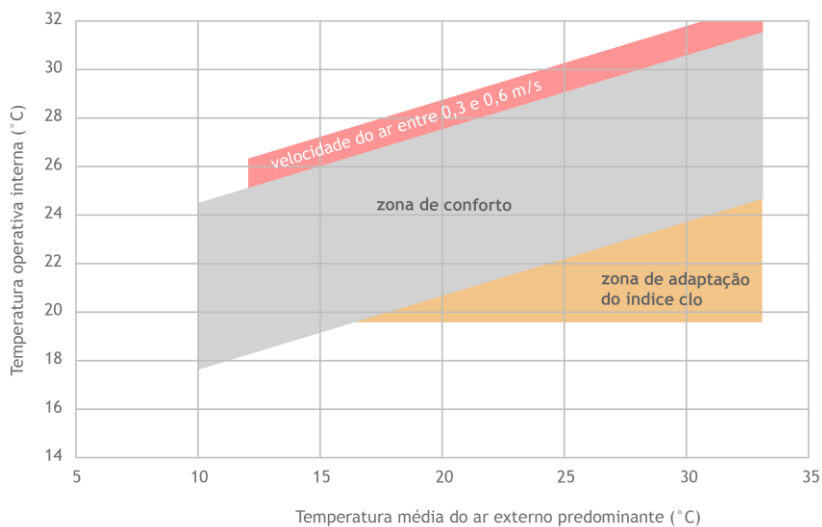
Caso a temperatura operativa interna seja superior a 25°C, é previsto o aumento do limite superior de aceitabilidade proporcionalmente aos valores de velocidade do ar superiores a 0,3 m/s, como descrito na Tabela 1. O limite inferior de aceitabilidade também pode ser expandido quando a temperatura operativa interna for superior a 19,5°C ao mesmo tempo em que temperatura média do ar externo exceder a 16,5°C. Nessa condição a zona de adaptação ao “clo” deve ser utilizada como mostra Figura 6.

**Tabela 1 - Aumento nos limites de temperatura aceitável (zona de conforto adaptativo) em ambientes naturalmente ventilados em função da velocidade média do ar. Para velocidades acima de 0,3 m/s esses limites podem ser extrapolados em até 2,2°C.**

>0,3 m/s e ≤0,6 m/s	>0,6 m/s e ≤0,9 m/s	>0,9 m/s e ≤1,2 m/s
1,2°C	1,8°C	2,2°C

Fonte: ASHRAE 55(2017b), adaptado pelos autores.

**Figura 6 - Incremento da zona de conforto adaptativo em função de variáveis de velocidade do ar e índice “clo”**



Fonte: Rackes, Melo e Lamberts (2016), adaptado pelos autores.

A partir dos resultados de simulação da sala de aula, comparam-se as temperaturas operativas com os limites de conforto térmico calculados. Dessa forma é possível computar o número de horas dentro dos limites da zona de conforto e o número de horas em desconforto por frio ou calor.

### Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade, segundo Saltelli, Ratto, Andres, Campolongo *et al.* (2008), é o estudo de como a incerteza nas saídas de um modelo pode ser repartida em diferentes fontes de incertezas nas entradas do modelo. Hopfe e Hensen (2011) apontam nessa circunstância que, independentemente do tipo de edificação, as incertezas físicas estão sempre presentes e referem-se a todo tipo de imprecisão associada à caracterização de um modelo de simulação.

Este método é utilizado para indicar quais parâmetros, caracterizados como dados de entrada do modelo de simulação, exercem maior influência nos dados de saída estudados. É resultado de simulações sistemáticas a partir de uma amostragem aleatória, em que se observa a relação de uma série de variáveis independentes sobre uma ou mais variáveis dependentes.

Para processamento da análise de sensibilidade, utilizou-se o mesmo *software* de simulação<sup>2</sup>. A definição da amostragem submetida baseou-se no método do Hipercubo Latino, o qual define amostras aleatórias a partir de vetores associados a cada uma das variáveis independentes, considerando uma determinada probabilidade de ocorrência em função do tipo de distribuição adotado (Silva; Ghisi, 2014b). A partir dessa amostra, aplica-se o método estatístico de regressão linear múltipla, no qual várias possibilidades são comparadas entre si com o intuito de interpretar a relação entre diferentes parâmetros de entrada, auxiliando a compreensão de variâncias em um dado de saída típico.

O resultado da análise é determinado pelo coeficiente de regressão padronizado (*SRC - Standardized Coefficient Regression*), que exprime o grau de influência de determinada variável sobre os dados de saída de um modelo de simulação (Gagnon; Gosselin; Decker, 2018; Silva; Ghisi, 2014b, 2020). Outros índices resultantes desse tipo de análise são os coeficientes de determinação (*adjusted R-squared*) e probabilidade (*p-value*), responsáveis por indicar o nível de confiabilidade dos resultados (Choi, 2017; DesignBuilder, 2019).

Foram definidas nove variáveis independentes, representadas na Figura 7, a partir das características do modelo padrão de sala de aula. Tais dados representam parâmetros que não possuem correlação entre si, ou seja, dados que exprimem diferentes características do modelo. Nesse sentido, para cada uma dessas variáveis foram considerados intervalos de variância, por meio de curvas de distribuição, com o propósito de definir diferentes cenários de simulação constituindo assim a amostra aleatória. Para tal, o método de regressão linear exige a caracterização do tipo de distribuição, entre discreta e contínua, assim como sua frequência para cada variável.

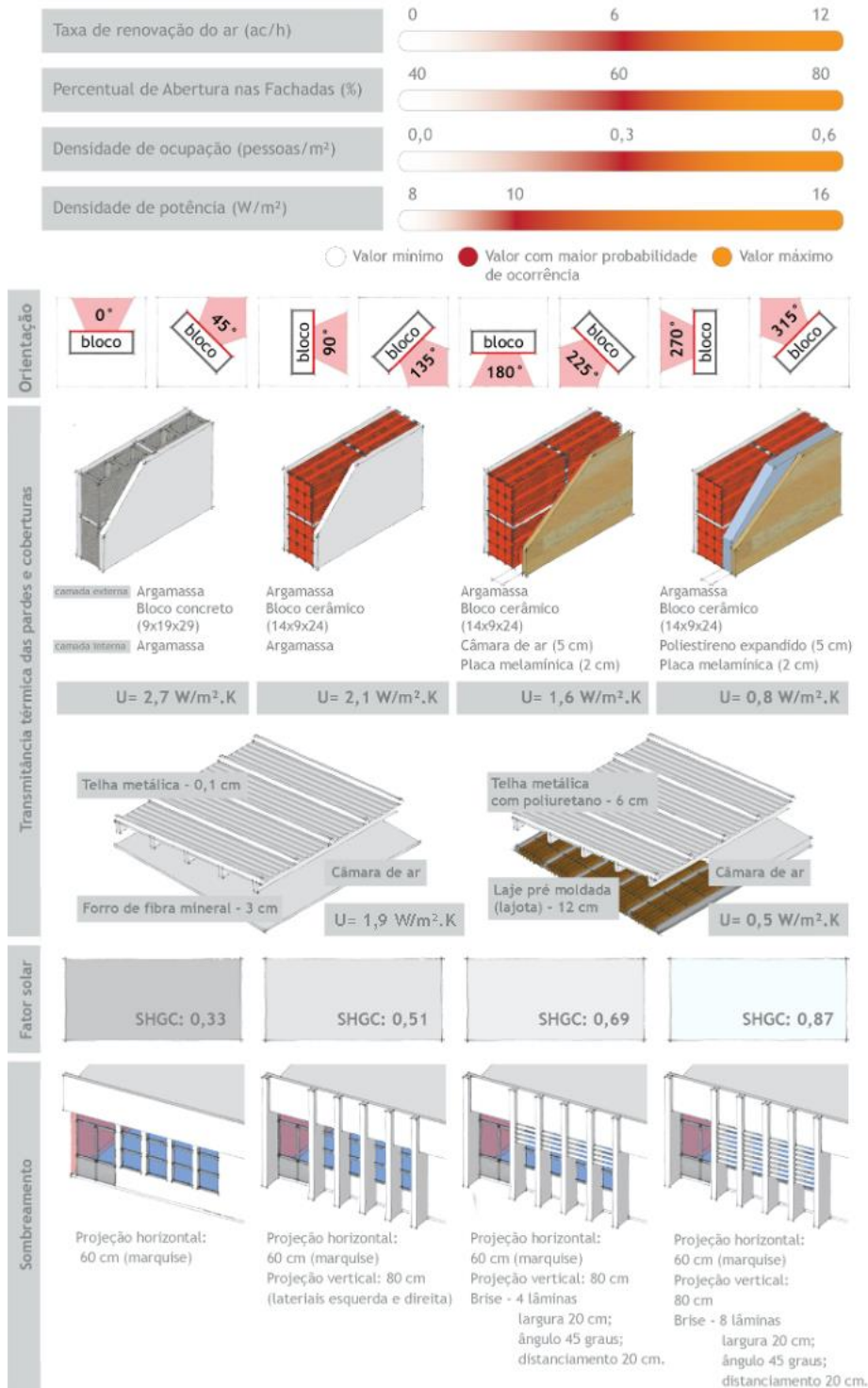
As curvas de distribuição representam padrões de frequência de determinada variável na amostra (Triola, 2015). Por meio delas é possível interpretar a possibilidade de ocorrência de um parâmetro entre seus valores mínimo, médio e máximo, e dependem do tipo de variável, se discreta ou contínua (Silva; Santos; Ghisi, 2014a, 2020) e de sua distribuição que pode ser uniforme, binomial e triangular (Carpino; Bruno; Carpino; Arcuri, 2022; Chong; Xu; Lam, 2015; DesignBuilder, 2019).

As variáveis contínuas são aquelas que podem assumir qualquer valor em um intervalo definido, como é o caso das taxas de renovação de ar por hora em função da ventilação natural ou estanqueidade da envoltória, percentual de abertura nas fachadas e densidades de ocupação e potência. As variáveis discretas, representam valores determinados, inteiros e contáveis. Nessa pesquisa essas variáveis representam intervalos caracterizados por possíveis ângulos de implantação, diferentes tipos de paredes externas e cobertura, determinados por seus valores de transmitância, tipos de sombreamento adotados, fator solar do vidro e transmitância térmica do vidro. Quanto a essa última variável, optou-se por sua associação a um valor fixo de 5,6 W/m<sup>2</sup>.K.

Uma vez determinadas as variáveis para análise de sensibilidade e caracterizadas no modelo de simulação, procede-se com a leitura dos coeficientes de regressão padronizado (*SRC*), determinação (*adjusted R<sup>2</sup>*) e probabilidade (*p-value*) resultantes da regressão linear. Os valores de *SRC* para cada variável independente são extraídos em

formato de gráfico de barras no software DesignBuilder, no qual também estão expressos seus respectivos coeficientes de probabilidade. O índice R<sup>2</sup> mede estatisticamente, em um intervalo entre 0 e 1, o quão próximo o modelo está de representar com exatidão um fenômeno e, portanto, se a maioria dos dados de entrada essenciais foram identificados.

Figura 7 - Variáveis contínuas e discretas consideradas para determinação da análise de sensibilidade



Fonte: os autores

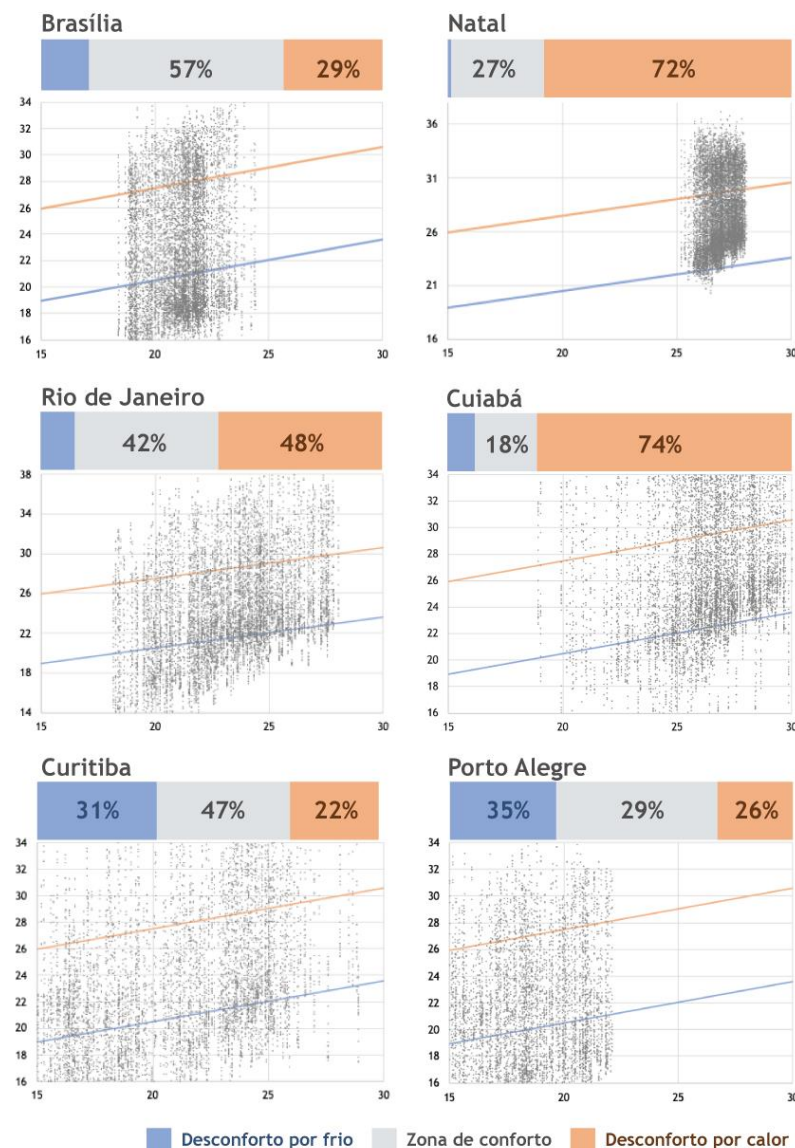
## Resultados e discussão

### Diagnóstico do Percentual de Horas Ocupadas em Conforto

Para cada um dos seis municípios estudados foi diagnosticado o percentual de horas ocupadas em conforto, para uma aceitabilidade de 80% dos usuários, com base nas temperaturas operativas extraídas da simulação em função da temperatura média do ar externo predominante. A partir desses resultados, foram calculados os percentuais de horas ocupadas em conforto ou em desconforto por calor ou frio considerando o período efetivo de ocupação (Figura 8). Esses resultados representam o modelo base submetido em seguida à uma análise de sensibilidade.

Observa-se também a necessidade de integração entre modelos adaptativos e racionais à avaliação de climas com temperaturas de bulbo seco muito superiores a 33,3°C, tornando pouco aplicáveis o uso somente de estratégias passivas. É o caso das cidades de Cuiabá, com máxima de 39,9°C, Rio de Janeiro, com 36,75°C, e Porto Alegre, com 40,6°C.

Figura 8 – Gráficos de temperatura operativa interna (eixo vertical) por temperatura média do ar externo predominante (eixo horizontal) e respectivos percentuais de horas ocupadas em conforto ou em desconforto por calor ou frio para as seis cidades estudadas



Fonte: os autores

### Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade se apresenta como potencial método para a integração da simulação no processo de projeto ao possibilitar a análise conjunta de diferentes variáveis e projeto (Gunay; Ouf; Newsham; O'Brien, 2019; Saltelli; Ratto; Andres; Campolongo et al, 2008; Silva; Ghisi, 2020; Yang; Tian; Cubi; Meng et al., 2016). Assim sendo, no caso de projetos padronizados de escola é possível definir, a partir de uma proposta específica, diferentes cenários que contemplem distintas possibilidades de implantação em função do conforto térmico do usuário.

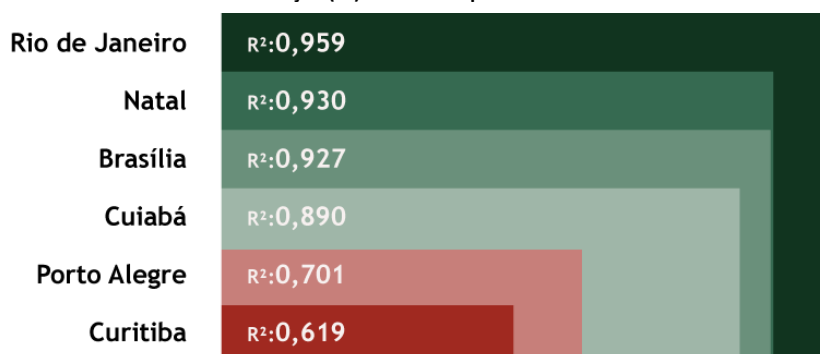
A amostra utilizada, resultante da aplicação do método de Hipercubo Latino, seguido da aplicação das diferentes variáveis descritas no método gerou uma média de 1440 rodadas de simulação, uma vez que para cada cidade foram consideradas 240 combinações entre as variáveis. A relação entre as variáveis aplicadas sobre o modelo base foi determinada segundo os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), probabilidade (*p-value*) e regressão padronizado (SRC).

O valor resultante do coeficiente de determinação, se for maior que 0,7, sendo o ideal acima de 0,9, indica que a equação de regressão apresenta alta precisão para os dados de saída. Já valores de  $R^2$  inferiores a 0,7, indicam que as variáveis definidas resultam em incertezas para os dados de saída determinados e, portanto, a regressão não apresentará resultados precisos (DesignBuilder, 2019). Nesse caso, pode ser necessário considerar outras variáveis para a análise ou verificar se os intervalos definidos necessitam ser ajustados.

Os resultados do índice  $R^2$  obtidos indicam que para as cidades de Brasília, Natal, Rio de Janeiro e Cuiabá, o modelo base se apresentou suficientemente adequado à descrição das variáveis de entrada mais sensíveis sobre o percentual de horas ocupadas em conforto, uma vez que os valores obtidos foram superiores a 0,8 (Tan; Szumanska, 2019). Portanto, para essas cidades os coeficientes de regressão padronizados (SRC) são precisos para a determinação do grau de influência de cada variável.

Para as cidades de Porto Alegre e Curitiba, os resultados obtidos para o índice  $R^2$  foram, respectivamente, de 0,70 e 0,61 (DesignBuilder, 2019). Nessa circunstância esses valores são considerados baixos para esse índice e indicam insuficiência do número de variáveis para uma correta descrição da sensibilidade do modelo perante o POC, representados na Figura 9 em vermelho. Dessa forma, afirmações conclusivas sobre esses modelos devem ser tomadas com atenção, além da necessidade de consideração de outras variáveis para que haja maior precisão nos dados de saída.

Figura 9 - Coeficientes de determinação ( $R^2$ ) resultantes por cidade



Fonte: os autores

Além do coeficiente R<sup>2</sup>, outro índice que representa o grau de confiança dos resultados de análise de sensibilidade é o coeficiente de probabilidade (p-value). Esse coeficiente indica, estatisticamente, o quanto uma variável independente tem efeito sobre a variável dependente (Silva; Santos; Ghisi, 2014a, 2020; Choi, 2017; Gagnon; Gosselin; Decker, 2018). Esse dado indica significância estatística no coeficiente de regressão padronizada, onde valores inferiores a 0,05 são considerados, portanto, confiáveis (DesignBuilder, 2019). Nesse sentido, as variáveis com p-value superior a 0,05 indicam baixo grau de confiabilidade em seus respectivos resultados de regressão, apresentando baixa convergência entre eles, como se pode observar na Figura 10.

Figura 10 - Resultados de coeficiente de probabilidade (p-value) para cada variável

	Brasília	Curitiba	Cuiabá	Natal	Porto Alegre	Rio de Janeiro
Sombreamento						
Transmitância das paredes externas (W/m <sup>2</sup> .K)						
Densidade de potência instalada (W/m <sup>2</sup> )						
Transmitância da cobertura (W/m <sup>2</sup> .K)		0,053				
Fator solar do vidro (%)		0,056			0,003	
Orientação solar (°)		0,067			0,018	
Percentual de abertura nas fachadas (%)	0,348	0,089	0,116	0,039	0,280	0,079
Ventilação natural (trocas de ar por hora)	0,763	0,909	0,467	0,040	0,646	0,821

■ p-value = 0,0   
 ■ 0 < p-value ≤ 0,05   
 ■ p-value > 0,05

Fonte: os autores

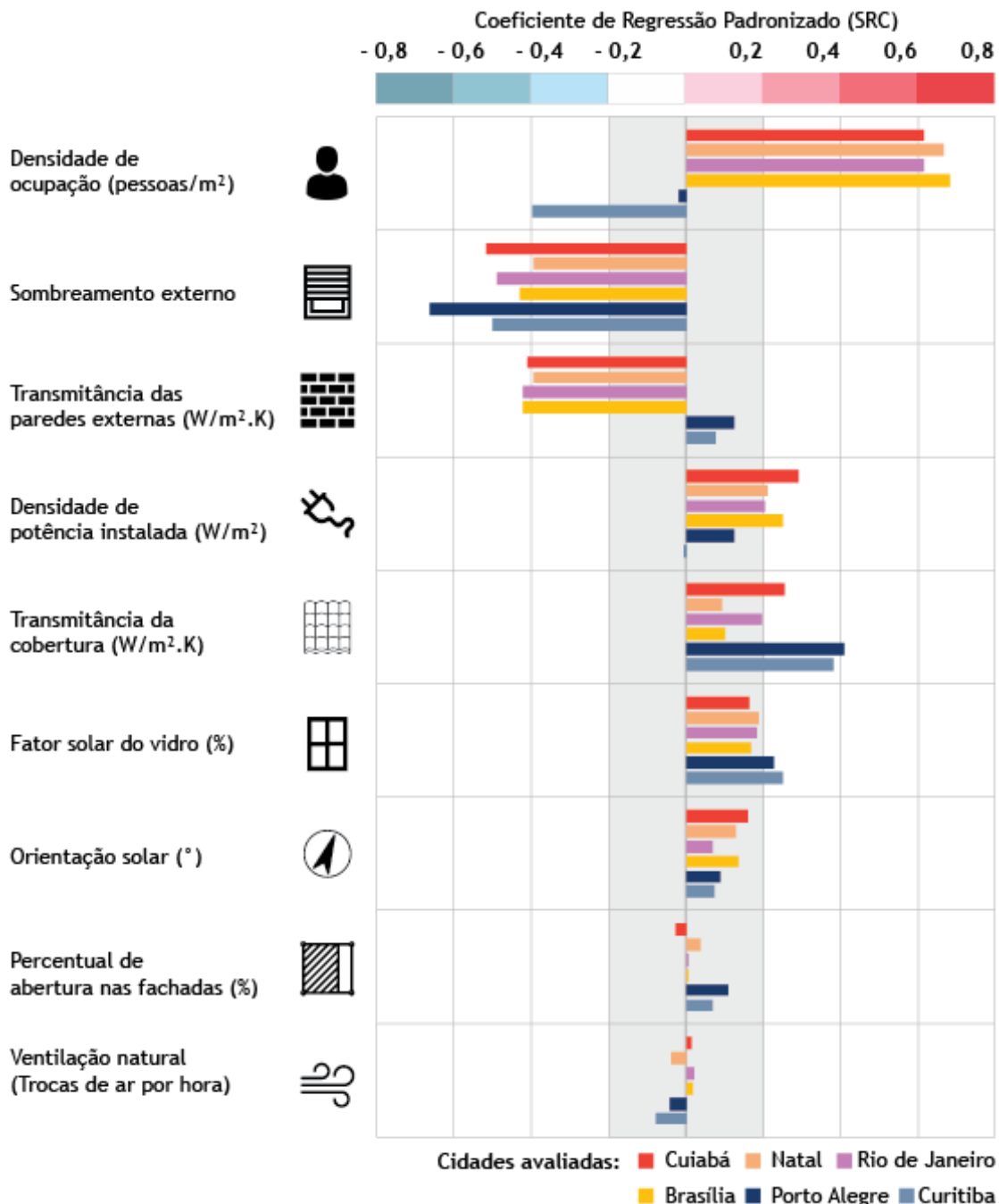
Nota-se que as variáveis com p-value superior a 0,05 referem-se em geral ao percentual de abertura nas fachadas e à ventilação natural, com exceção para os resultados obtidos para a cidade de Natal. Esse dado indica limitações do modelo ao representar o impacto desses parâmetros sobre o número de horas em desconforto por calor. Isso se dá pelo baixo percentual de abertura na fachada, no caso estudado, em relação ao total de área de envoltória considerado. Além disso a pesquisa limitou-se a analisar a ventilação em função de um intervalo de trocas de ar por hora e, portanto, pode haver imprecisões associadas à configuração da rede de ventilação (*airflow network*).

Para cada uma das 9 variáveis de entradas configuradas no modelo obteve-se valores para o índice SRC, apresentados na Figura 11. Esses resultados indicam relativa influência de sua respectiva variável sobre os dados de entrada e saída no modelo determinando, portanto, sua influência direta ou indiretamente proporcional. Sendo assim, um valor de SRC mais próximo de 1,0 indica que determinada variável apresenta significativo impacto sobre o número de horas em desconforto, enquanto valores mais próximos a -1,0 apontam para o comportamento inverso.

A grandeza absoluta referente ao índice SRC revela a ordem de sensibilidade de cada variável sobre o número de horas em desconforto por calor e representa, portanto, o quanto a variação nesse dado de entrada impacta os resultados expressos nos dados de

saída. Assim, a fim de melhor compreender a influência de cada variável sobre o desconforto térmico por calor, no caso estudado, elaborou-se um diagrama síntese, representado na Figura 12, onde para cada cidade é possível observar a importância e significância de determinada variável, orientando de forma mais clara a tomada de decisão.

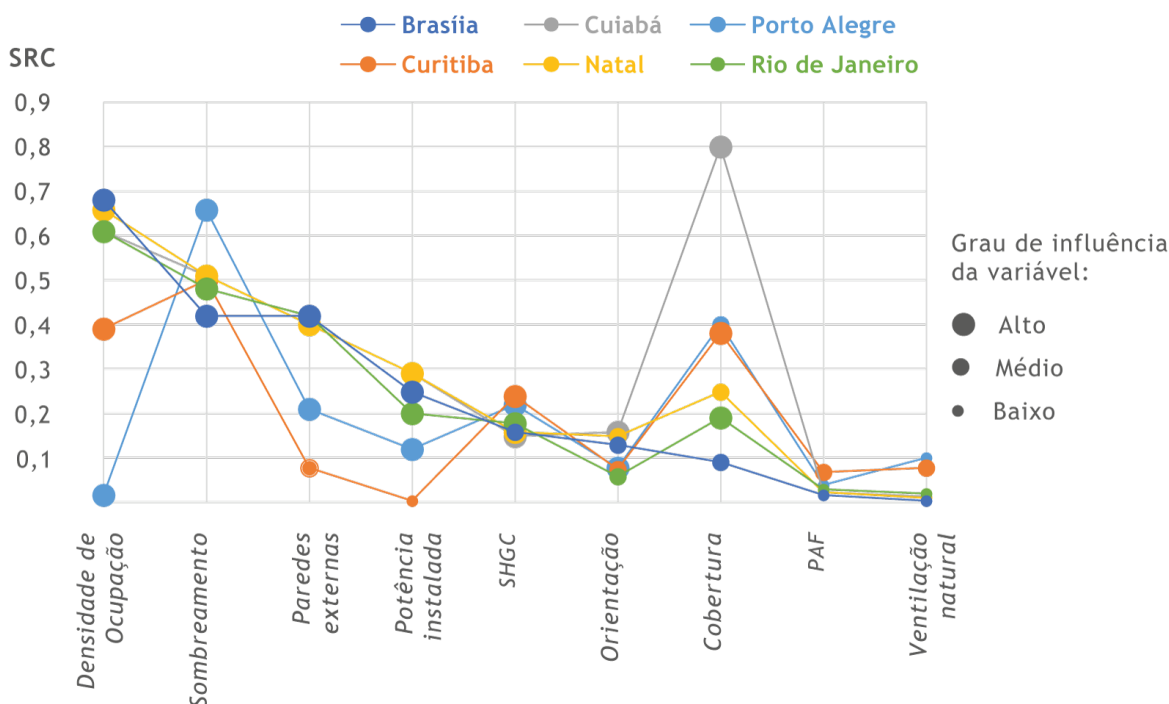
Figura 11 - Coeficientes de regressão padronizados (SRC) por variável de entrada do modelo simulado para cada uma das cidades avaliadas



Fonte: os autores



Figura 12 – Valores absolutos de SRC distribuídos por grau de influência das variáveis



Fonte: os autores

A partir desses resultados, observou-se que a variável “densidade de ocupação (pessoas/m<sup>2</sup>)” apresenta maior influência sobre o percentual de horas em desconforto por calor nas cidades de Cuiabá, Natal, Rio de Janeiro e Brasília, em ordem diretamente proporcional. Nesse sentido, qualquer acréscimo nessa variável resulta em um maior número de horas em desconforto por calor.

Para todas as cidades a variável “sombreamento externo” indica alto grau de impacto em ordem indiretamente proporcional à variável de saída, com valores de SRC inferiores a -0,4. Entende-se, portanto, que o POC é expressivamente sensível ao tipo de dispositivo de sombreamento adotado em função das áreas de aberturas, representando um dos mais importantes elementos de projeto a serem adequadamente dimensionados.

Com relação à variável “transmitância das paredes externas”, os índices SRC obtidos para as cidades do Rio de Janeiro, Brasília, Cuiabá e Natal, revelam uma relação inversamente proporcional ao percentual de horas em desconforto por calor. Portanto, para essas cidades o aumento da transmitância térmica das paredes seria favorável até um limite de 2,3 W/m<sup>2</sup>.K. Para as cidades de Porto Alegre e Curitiba a redução nos valores de transmitância das paredes implica em um maior impacto no POC, sendo favorável a adoção de valores próximos a 0,8 W/m<sup>2</sup>.K.

A variável “transmitância da cobertura” apresentou altos valores de SRC diretamente proporcionais ao percentual de horas em desconforto por calor para todos os contextos climáticos estudados. Esse dado indica que pequenas variações nos valores de transmitância da cobertura contribuem para que um maior número de horas represente desconforto ao usuário, corroborando a adoção de valores entre 0,8 e 0,6W/m<sup>2</sup>.K, a fim de reduzir a transmissão de calor ao interior do ambiente.

Com relação ao “fator solar dos vidros”, observou-se que apenas para as cidades de Porto Alegre e Curitiba sua variação pode ser considerada relevante em função do

número de horas em desconforto por calor para o modelo simulado. Os resultados de SRC para essas cidades encontram-se entre 0,2 e 0,4, indicando que quaisquer acréscimos nessa variável influenciam no aumento do número de horas em desconforto por calor. Para as demais cidades é possível desconsiderar o efeito do fator solar, determinando um valor fixo economicamente mais viável.

Dentre as nove variáveis de entrada independentes para a realização da análise de sensibilidade, três delas apresentaram SRC em um intervalo entre -0,2 e 0,2, são elas: “orientação solar”, “percentual de abertura nas fachadas” e “taxa de renovação de ar por hora”. Nesse sentido, para o modelo simulado, o acréscimo ou redução no valor desses parâmetros pouco influem sobre o POC.

No entanto, a baixa influência dessas variáveis está diretamente associada à relação entre o volume da sala de aula e sua área de envoltória, bem como seu reduzido percentual de abertura da fachada, demandando a investigação desses parâmetros aplicados sob diferentes condições de exposição. Além disso, sabe-se que a área de superfícies translúcidas e orientação das fachadas impactam diretamente no conforto dos usuários (Cabral; Góes; Amorim; Silva, 2019; Costa; Amorim, 2022; Sokol; Kurek; Martyniuk-Peczek; Amorim et al., 2022) e, portanto, tais variáveis deveriam ser abordadas por meio de análise de desconforto localizado.

Nesse enquadramento, a fim de atribuir valores específicos relacionando as variáveis considerada para determinação dos diferentes modelos de simulação (Figura 7) aos resultados apontados no diagrama síntese (Figura 12), a Tabela 2 descreve as características mais adequadas a cada contexto climático avaliado.

**Tabela 2 - Características mais adequadas a cada contexto climático a partir dos resultados indicados no diagrama síntese**

	Curitiba	Porto Alegre	Brasília	Rio de Janeiro	Natal	Cuiabá
Fator solar (aberturas não sombreadas)	0,69		*		0,69	
Fator solar (aberturas sombreadas) (%)		0,69			0,87	
Transmitância das paredes (W/m <sup>2</sup> .K)		0,8			2,3	
Transmitância da cobertura (W/m <sup>2</sup> .K)			0,6			
Câmara de ar	Não			Sim		
Densidade ocupacional (pessoas/m <sup>2</sup> )		≤ 0,3			≤ 0,2	
Sombreamento	A		-	B		C

Nota: (\*) Ventilação permanente, recomenda-se uso de cobogós. (\*\*) Todos elementos de sombreamento requerem projeção horizontal e fechamento vertical. (A) Placa perfurada com 50% de área opaca. (B) Brises horizontais fixos. (C) Brises horizontais operáveis. Fonte: os autores.

## Conclusão

O propósito central no emprego de métodos baseados em simulação é aprimorar a compreensão do comportamento termodinâmico do projeto arquitetônico. Nesse sentido, tem importante papel a formulação de diretrizes, como no caso do desenvolvimento de projetos padronizados de escolas enquanto política pública, onde torna-se fundamental o entendimento amostral em diferentes contextos climáticos.

Esse artigo se propôs a avaliar o conforto térmico adaptativo de um projeto escolar padronizado, integrante do catálogo de projetos do FNDE, sistematizando seus resultados a partir da relação entre métodos dispostos em normas e regulamentos a fim de auxiliar a tomada de decisões. Para tal, obteve-se diagnóstico de conforto térmico de um ambiente escolar padronizado para seis cidades brasileiras de climas variados.

A partir da comparação da temperatura operativa interna de uma sala de aula, considerando ou não a operação das aberturas, observa-se a relevância da ventilação natural no período de ocupação. No entanto, o efeito dessa estratégia aplica-se

somente quanto a temperatura de bulbo seco for inferior à temperatura operativa do ambiente.

A redução do modelo de simulação a apenas uma zona representativa se mostrou aplicável à compreensão do conforto térmico do projeto padrão, e viável à aplicação em outros contextos. No entanto, o uso desse tipo de modelo não exclui a possibilidade de se adotar um modelo mais complexo que leve em consideração outros fatores relevantes para entender o comportamento termoenergético do edifício e os fenômenos locais associados a ele.

O diagnóstico de conforto térmico referente à proposta inicial, apresentada pela CODIN, destacou a dificuldade de se utilizar o mesmo padrão arquitetônico em contextos climáticos diferentes a partir da discrepância entre os percentuais de horas ocupadas em conforto ou em desconforto por calor ou frio. As especificações dessa proposta referem-se à envoltória com paredes em bloco cerâmico de 9 furos revestidos em argamassa ( $U=1,60 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ), cobertura com Isotelha IF30 ( $U=0,67 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ) e sombreamento em chapa metálica perfurada. Nesse contexto, os resultados com percentuais de horas ocupadas em conforto mais favoráveis foram para os climas de Brasília, Rio de Janeiro e Curitiba com 57%, 42% e 47% respectivamente, enquanto para Natal, Cuiabá e Porto Alegre, os valores obtidos foram de 27%, 18% e 29%.

A adoção de modelos de conforto adaptativo é imprescindível à compreensão de incertezas relativas ao comportamento do usuário e do quanto a arquitetura se relaciona com seu clima de implantação. No entanto, por se aplicarem somente à análise do número de horas em desconforto por calor, são limitados a climas com baixas amplitudes térmicas.

A análise de sensibilidade se mostrou uma importante ferramenta à otimização de projetos. A aplicação desse método viabiliza a aferição do efeito de um extenso número de variáveis sobre os dados de saída, reduzindo o tempo destinado a simulações e análises de desempenho do projeto. Portanto, a equipe de projeto tem a possibilidade de acessar informações fundamentais à tomada de decisões em menor prazo.

As variáveis mais influentes no percentual de horas em conforto para todos os casos relacionam-se à densidade de ocupação e características da envoltória. Assim sendo, é possível identificar padrões de uso e caracterização do projeto mais adequados a cada contexto climático. Já para as demais variáveis pode-se considerar valores fixos economicamente mais viáveis.

A representação grau de influência das variáveis sobre o POC resume os resultados obtidos a partir da aplicação dos procedimentos metodológicos adotados, e se apresenta como uma ferramenta útil à simplificação das informações necessárias ao desenvolvimento do projeto e importante instrumento de consulta. A partir dos dados dimensionais e especificações do projeto é possível fazer alterações nas características do projeto padrão para cada cidade, com o propósito de reduzir o número de horas em desconforto por calor, direcionando novos projetos mais adaptados aos seus locais de implantação.

A pesquisa apresentou algumas limitações como a caracterização do projeto restrita ao padrão de projeto disponível pela equipe da CODIN/FNDE, considerando apenas uma sala de aula. Além disso o modelo de rede de ventilação empregado em conjunto à verificação dos valores de renovação de ar por hora fixos limitou ao processamento dos dados de temperatura operativa e temperatura de bulbo seco.

Em função do modelo de conforto adotado nessa pesquisa, a variável de saída para verificação da influência das características do modelo sobre o número de horas ocupada em conforto foi o número de horas em desconforto por calor. Ao verificar o coeficiente de determinação observou-se que a utilização dessa variável não se mostrou suficiente à representação das condições de conforto térmico em climas frios como de Curitiba e Porto Alegre.

## **Agradecimentos**

Os autores agradecem à equipe da Coordenação de Desenvolvimento e Infraestrutura (CODIN) da FNDE pela disponibilização dos materiais referentes ao projeto padrão estudado, à CAPES pela bolsa de mestrado destinada à essa pesquisa viabilizando sua realização e ao CNPq por meio do projeto Escolas Bioclimáticas e o projeto de pesquisa SIM-Verde, vinculado ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília.

## **Referências**

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2:** Desempenho térmico de edificações - Parte 2 – Componentes e elementos construtivos das edificações — Resistência e transmitância térmica — Métodos de cálculo. Rio de Janeiro: ABNT, 2005b. 34 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3:** Desempenho térmico de edificações. Parte 3 – Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005a. 30 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401-2:** Parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

AGARWAL, M.; PASTORE, L.; ANDERSEN, M. ASHRAE 209: Process, a key ingredient to high performance design. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION, 16., 2019, Rome. **Proceedings [...]**. Rome: IBPSA, 2019.

AIA. AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS. **Architect's Guide to Building Performance**. Washington: AIA, 2019. Disponível em: [https://content.aia.org/sites/default/files/2019-06/AIA\\_BPSGuide\\_2019\\_FINAL.pdf](https://content.aia.org/sites/default/files/2019-06/AIA_BPSGuide_2019_FINAL.pdf). Acesso em: 17 fev. 2023.

ARAÚJO, M. L. T. DE. **Avaliação de Desempenho Térmico em Creche do Programa ProInfância nas zonas bioclimáticas brasileiras**. 2019. 174 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/215127>. Acesso em: 17 fev. 2023.

ARENHARDT, N. L.; WANDER, P. R. Um panorama sobre os estudos relacionados ao conforto térmico em salas de aula. **Revista Produção Online**, v. 18, n. 3, p. 901–919, 2018. DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v18i3.2989>.

ASHRAE. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 90.1 - Energy standard for buildings except low-rise residential buildings**. Atlanta: ASHRAE, 2019.

ASHRAE. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 189.1: Standard for the Design of HighPerformance Green Buildings**. Atlanta: ASHRAE, 2017a.

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

ASHRAE. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 209: Energy Simulation Aided Design for Buildings Except Low-Rise**. Atlanta: ASHRAE, 2018.

**LOPES, A. F. O.; SILVA, C. F. e; AMORIM, C. N. D.; BATISTA, J. O.**

Avaliação do desempenho térmico de ambiente escolar padronizado, em contexto climático brasileiro, por meio de simulação termoenergética

---

BARBHUIYA, S.; BARBHUIYA, S. Thermal comfort and energy consumption in a UK educational building. **Building and Environment**, v. 68, p. 1-11, Oct. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.06.002>.

BAVARESCO, M. V.; MAZZAFERRO, L.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. **Classificação de climas brasileiros empregada na atualização dos Regulamentos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações.**

Florianópolis: Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações, 2017. Disponível em:

[https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/documents/Relatorio\\_GruposClimaticos.pdf](https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/documents/Relatorio_GruposClimaticos.pdf). Acesso em: 17 fev. 2023.

BITTENCOURT, L. S. Meu, dele ou de outros? Especulações sobre o desejo no projeto arquitetônico. In: LEITÃO, L.; AMORIM, L. (org.). **A casa nossa de cada dia**. Recife: Luiz Amorim, 2007. 198 p.

BOGO, A. J. Reflexões críticas quanto as limitações do texto das normas brasileiras de desempenho NBR 15220-3 e NBR 15575. **HOLOS**, v. 7, p. 290–298, 2016. DOI: <https://doi.org/10.15628/holos.2016.4389>.

BRASIL. Ministério da Educação. **O Plano de Desenvolvimento da Educação: razões, princípios e programas**. Brasília: MEC, 2007. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/arquivos/livro/livro.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2023.

BRITO, A. C. P.; BRITO, C. M. B.; BORTOLOTO, V. M.; SILVA, C. F. E; AMORIM, C. N. D. O processo de projeto de edifício escolar: Barreiras e perspectivas para o conforto e eficiência energética. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11., 2019, João Pessoa. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2019. p. 2417-2426.

CABRAL, P.; GÓES, T.; AMORIM, C.; SILVA, C. F. Análise da área envidraçada e sua influência para o conforto térmico de ambientes residenciais em Brasília-DF. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., 2019, João Pessoa. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2019. p. 921-930. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/encac/article/view/3987>. Acesso em: 15 fev. 2023.

CARPINO, C.; BRUNO, R.; CARPINO, V.; ARCURI, N. Improve decision-making process and reduce risks in the energy retrofit of existing buildings through uncertainty and sensitivity analysis. **Energy for Sustainable Development**, v. 68, p. 289-307, June 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.04.007>

CHOI, J.-H. Investigation of the correlation of building energy use intensity estimated by six building performance simulation tools. **Energy and Buildings**, v. 147, p. 14–26, July 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.078>.

CHONG, A.; XU, W.; LAM, K. P. Uncertainty analysis in building energy simulation-a practical approach. In: CONFERENCE OF INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMILARION, 14., 2015, Hyderabad. **Proceedings [...]**. Hyderabad, India: IBPSA, 2015. DOI: <https://doi.org/10.26868/25222708.2015.2131>.

COSTA, J. F. W.; AMORIM, C. N. D. Materiais transparentes e translúcidos inovadores em fachadas e seu desempenho em iluminação natural: panorama internacional e aplicabilidade no contexto brasileiro. **Ambiente Construído**, v. 22, n. 4, p. 179-198, out./dez. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212022000400635>.

CRAWLEY, D. Building simulation for policy support. In: HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. (org.). **Building Performance Simulating for Design and Operation**. 2nd. ed. London: Routledge, 2019. 772 p.

CRAWLEY, D. B.; LAWRIE, L. K.; WINKELMANN, F. C.; BUHL, W. F.; HUANG, Y. J.; PEDERSEN, C. O.; STRAND, R. K.; LIESEN, R. J.; FISCHER, D. E.; WITTE, M. J.; GLAZER, J. EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program. **Energy and Buildings**, v. 33, n. 4, p. 319–331, Apr. 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00114-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00114-6).

DE DEAR, R. J.; BRAGER, G. S. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. **ASHRAE Transactions**, v. 104, pt. 1, p. 145–167, Feb. 1998.

DESIGNBUILDER. **Uncertainty and Sensitivity Analysis - Advanced Tutorial**. 2019. Disponível em: <https://designbuilder.co.uk/helpv7.0/index.htm#UASAAAdvancedTutorial.htm?Highlight=p-value>. Acesso em: 15 fev. 2023.

**LOPES, A. F. O.; SILVA, C. F. e; AMORIM, C. N. D.; BATISTA, J. O.**

Avaliação do desempenho térmico de ambiente escolar padronizado, em contexto climático brasileiro, por meio de simulação termoenergética

---

FERREIRA, C. C.; SOUZA, H. A.; ASSIS, E. S. Discussão dos limites das propriedades térmicas dos fechamentos opacos segundo as normas de desempenho térmico brasileiras. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 183–200, jan.-mar. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000100131>.

FREITAS, L. F.; LIMA, F. R.; OLIVEIRA, R. D. Análise das condições de conforto térmico dos usuários em ambientes naturalmente ventilados: simulação aplicada à edificação escolar pública. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., 2019, João Pessoa. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2019. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/encac/article/view/3990>. Acesso em: 20 ago. 2023.

GAGNON, R.; GOSELIN, L.; DECKER, S. Sensitivity analysis of energy performance and thermal comfort throughout building design process. **Energy and Buildings**, v. 164, p. 278–294, Apr. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.066>.

GU, L. Airflow network modeling in energyplus. In: INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION, 2007, Coca. **Proceedings [...]**. Beijing: IBPSA, 2007. Disponível em: [http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2007/p398\\_final.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2007/p398_final.pdf). Acesso em: 20 fev. 2023.

GUNAY, H. B.; OUF, M.; NEWSHAM, G.; O'BRIEN, W. Sensitivity analysis and optimization of building operations. **Energy and Buildings**, v. 199, p. 164–175, Sept. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.048>.

HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. Building performance simulation – challenges and opportunities. In: HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. (ed.). **Building Performance Simulation for Design and Operation**. 2nd. ed. New York: Routledge, 2019. p. 1-10. 772 p.

HOPFE, C. J.; HENSEN, J. L. M. M. Uncertainty analysis in building performance simulation for design support. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 10, p. 2798–2805, Oct. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.034>.

JANKOVIC, L. **Designing zero carbon buildings using dynamic simulation methods**. Londres: Routledge, 2013. 450 p.

KOWALTOWSKI, D. C. C. K. **Arquitetura escolar: O projeto de ambiente de ensino**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 272 p.

KOWALTOWSKI, D. C. C. K.; DELIBERADOR, M. S.; PEREIRA, P. R. P. Arquitetura escolar e seu processo de projeto. In: KOWALTOWSKI, D. C. C. K.; MOREIRA, D. C.; PETRECHE, J. R. D.; FABRÍCIO, M. M. **O processo de projeto em arquitetura: da teoria a tecnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 504 p.

MODLER N. L.; BERLEZE A. S.; TSUTSUMI E. K.; LINCZUK V. C. C.; AZEVEDO G. A. N. Avaliação de desempenho de um projeto padrão do programa Proinfância: escola de educação infantil no sul do Brasil. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 13, n. 2, p. 95-118, maio 2018. DOI: <https://doi.org/10.11606/gtp.v13i2.126495>.

PEGLOW, J.; RITTER, V.; RONCA, A.; PEREIRA, R.; CUNHA, E.; RHEINGANTZ, P. Avaliação do conforto térmico de escola municipal de educação infantil em Pelotas/RS – ZB2. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2016.

PERILLO, Paulo José Lima; CAMPOS, Marcus André Siqueira; ABREU-HARBICH, Loyde Vieira. Conforto térmico em salas de aula: revisão sistemática da literatura. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 8, n. 4, p. 236-248, dez. 2017. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v8i4.8650268>.

RACKES, A.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Naturally comfortable and sustainable: Informed design guidance and performance labeling for passive commercial buildings in hot climates. **Applied Energy**, v. 174, p. 256–274, July 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.081>.

RORIZ, M. **Classificação de climas do Brasil – Versão 3.0**. São Carlos: ANTAC, 2014. 5 p. Disponível em: [https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/Climas\\_v3.pdf](https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/Climas_v3.pdf). Acesso em: 17 fev. 2023.

**LOPES, A. F. O.; SILVA, C. F. e; AMORIM, C. N. D.; BATISTA, J. O.**

Avaliação do desempenho térmico de ambiente escolar padronizado, em contexto climático brasileiro, por meio de simulação termoenergética

---

SALTELLI, A.; RATTO, M.; ANDRES, T.; CAMPOLONGO, F.; CARIBONI, J.; GATELLI, D.; SAISANA, M.; TARANTOLA, S. **Global sensitivity analysis: The primer**. Londres: John Wiley, 2008. 304 p. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470725184>. Acesso em: 18 jan. 2023.

SARTORI, G.; SILVA FILHO, L. C. P.; TORRES, M. C. A. Análise do método de avaliação térmica dos projetos de pré-escolas do programa Proinfância. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 12, p. e021020, 2021. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v12i00.8661249>.

SILVA, A. S.; ALMEIDA, L. S. S.; GHISI, E. Decision-making process for improving thermal and energy performance of residential buildings: A case study of constructive systems in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 270–286, Sept. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.084>.

SILVA, A. S.; GHISI, E. Análise comparativa dos resultados do desempenho térmico da envoltória de uma edificação residencial pelos métodos de simulação do RTQ-R e da NBR 15575-1. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 1, p. 215–230, mar. 2014b. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212014000100016>.

SILVA, A. S.; GHISI, E. Estimating the sensitivity of design variables in the thermal and energy performance of buildings through a systematic procedure. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, Jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118753>.

SILVA, A.; SANTOS; GHISI, E. Uncertainty analysis of the computer model in building performance simulation. **Energy and Buildings**, v. 76, p. 258–269, June 2014a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.070>.

SOKOL, N.; KUREK, J.; MARTYNIUK-PECZEK, J.; AMORIM, C. N. D.; VASQUEZ, N. G.; KANNO, J. R., SIBILIO, S.; MATSIK, B. Boundary conditions for non-residential buildings from the user's perspective: Literature review. **Energy and Buildings**, v. 268, Aug. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112192>.

SREBRIC, J. Ventilation performance prediction. In: LAMBERTS, R.; HENSEIN, J. L. M. **Building Performance Simulation for Design and Operation Simulation**. 2nd ed. Abingdon: Routledge, 2019. 772 p.

TAHSILDOOST, M.; ZOMORODIAN, Z. S. Energy retrofit techniques: An experimental study of two typical school buildings in Tehran. **Energy and Buildings**, v. 104, p. 65–72, Oct. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.079>.

TAN, T.; SZUMANSKA, M. **Sensitivity and Uncertainty Analysis of Building Parameters integrating energy, daylight and thermal comfort**. 2019. 180 f. (Master thesis in Energy-efficient and Environmental Building Design) - Department of Architecture and Built Environment, Lund University, Lund, 2019. Disponível em: <http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/8996388>. Acesso em: 29 maio 2023.

TIAN, W. A review of sensitivity analysis method in building energy analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, p. 411–419, Apr. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.014>.

TRIOLA, M. F. **Essential of Statistics**. 5th. ed. Boston: Pearson, 2015. 704 p.

WALSH, A.; CÓSTOLA, D.; LABAKI, L. **Proposta de zoneamento climático brasileiro para edificações residenciais**. São Paulo, 2023. 301 p.

WALTON, G. N. Airflow network models for element-based building airflow modeling. **ASHRAE Transactions**, v. 95, pt. 2, p. 611-620, 1989.

WEBER, F. S.; MELO, A. P.; MARINOSKI, D. L.; GUTHS, S.; LAMBERTS, R. **Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2017. 52 p. Disponível em: [https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios\\_pesquisa/Biblioteca\\_ComponentesConstrutivos\\_o.pdf](https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/Biblioteca_ComponentesConstrutivos_o.pdf). Acesso em: 8 ago 2022.

**LOPES, A. F. O.; SILVA, C. F. e; AMORIM, C. N. D.; BATISTA, J. O.**

Avaliação do desempenho térmico de ambiente escolar padronizado, em contexto climático brasileiro, por meio de simulação termoenergética

---

WEST, S.; NDIAYE, D. Energy Simulation Aided Design for Buildings: ASHRAE Standard 209. **ASHRAE Journal**, v. 61, n. 12, p. 20–26, Dec. 2019.

YANG, S.; TIAN, W.; CUBI, E.; MENG, Q.; LIU, Y.; WEI, L. Comparison of Sensitivity Analysis Methods in Building Energy Assessment. **Procedia Engineering**, v. 146, p. 174-181, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.369>.

---

#### **1 Adriano Felipe Oliveira Lopes**

Arquiteto e Urbanista. Mestre em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade de Brasília. Professor temporário do Instituto Federal da Bahia. Endereço postal: Av. David Jonas Fadini, s/n - Juca Rosa, Eunápolis - BA, CEP 45823-431.

#### **2 Caio Frederico e Silva**

Arquiteto e Urbanista. Doutor em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade de Brasília. Professor Associado na Universidade de Brasília. Endereço postal: Campus Universitário Darcy Ribeiro ICC Norte, Gleba A sala AD 493, Brasília, DF – Brasil. CEP 70904-970

#### **3 Cláudia Naves David Amorim**

Arquiteta e Urbanista. Doutora em Arquitetura e Urbanismo pela Università degli Studi di Roma "La Sapienza". Professora Associada na Universidade de Brasília. Endereço postal: Campus Universitário Darcy Ribeiro ICC Norte, Gleba A sala AD 493, Brasília, DF – Brasil. CEP 70904-970

#### **4 Juliana Oliveira Batista**

Arquiteta e Urbanista. Doutora em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal de Alagoas. Professora Adjunta na Universidade Federal de Alagoas. Endereço postal: Av. Lourival Melo Mota, S/N, Tabuleiro do Martins, Maceió, AL – Brasil. CEP 57072-900