

Estudo do conforto térmico devido à ventilação natural em salas de aula do Bloco C - ICTE/UFTM

Study of the natural ventilation for thermal comfort in Block C classrooms - ICTE/UFTM

Anderson Antonio Ubices de Moraes¹; Guilherme Azevedo Oliveira²; Juliane Cristina de Oliveira Fandi²; Simone Cristina Jesus de Moraes²

¹ Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1708-6771>.
E-mail: ubices@ufscar.br

² Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Minas Gerais, Brasil.
E-mail: guilherme.oliveira@uftm.edu.br; juliane.fandi@uftm.edu.br; simone.jesus@uftm.edu.br

RESUMO: O uso da ventilação natural é uma excelente técnica de climatização passiva de ambientes internos por promover condições térmicas confortáveis para seus ocupantes e reduzir o uso de energia elétrica pelos sistemas mecânicos de condicionamento. Neste trabalho, estudou-se a efetividade da ventilação natural de um conjunto de laboratórios e salas de aulas localizadas na cidade de Uberaba-MG durante um ano típico. As simulações térmicas dos ambientes foram realizadas pelo programa *Energy Plus*, enquanto se adotou o modelo de conforto térmico adaptativo e avaliação da efetividade pela porcentagem de horas ocupadas em conforto térmico (POC). Os principais parâmetros variados durante as simulações foram as cargas térmicas internas dos ambientes e a possibilidade de fechamento de portas e janelas em 6 distintas configurações. Os resultados mostram que a inserção das cargas térmicas internas pode variar consideravelmente o POC permitindo reduções do nível de eficiência de até 34%. Dos 21 ambientes analisados, na melhor configuração da ventilação natural, 14 apresentaram a pior eficiência possível obtendo etiqueta nível E, enquanto os demais tiveram POC inferiores a 51%, que demonstra a necessidade de uso de sistemas artificiais de climatização para garantir o conforto térmico dos ambientes no tempo restante de ocupação.

Palavras-chave: Conforto térmico adaptativo, Energy Plus, POC, Ventilação natural.

ABSTRACT: *The use of natural ventilation is an excellent passive air conditioning technique for indoor environments. In fact, it promotes comfortable thermal conditions for its occupants and reduces the use of electrical energy by mechanical conditioning systems. In this work, the effectiveness of natural ventilation in a set of laboratories and classrooms in Uberaba-MG- Brazil are focused. The thermal simulations of the environments were carried out by the EnergyPlus program. The adaptive thermal comfort approach has been evaluated throughout the evaluation of the percentage of hours occupied in thermal comfort (POC). The main parameters considered in the simulations were the internal thermal loads of the environments and the possibility of closing doors and windows in 6 different configurations. The results have highlighted that the insertion of the internal thermal loads have a straight relationship with the POC. Considering the 21 environments analyzed, with the best configuration of natural ventilation, 14 showed the worst possible efficiency. In fact, the simulations have indicated the performance as level E label. On the other hand, the remaining environments showed POC levels lower than 51%. This has demonstrated that artificial air conditioning systems are required to provide environments thermal comfort for such situations in the remaining occupation.*

Keywords: *adaptive thermal comfort, Energy Plus, POC, Natural Ventilation.*

INTRODUÇÃO

A eficiência energética é um tema recorrente pois mostra que um mesmo serviço pode ser obtido com um menor consumo energético e, conseqüentemente, menores impactos ambientais e sociais (DE VECCHI, 2011). No Brasil, mais de 50% de toda energia elétrica produzida são consumidas em edificações, sendo que, em edifícios públicos e comerciais, os gastos energéticos devido aos sistemas de climatização artificiais representam uma parcela superior a 40%. (BRASIL, 2007; BRASIL, 2016).

Uma das medidas adotadas por diversos países, após o tratado de Kyoto em 1997, foi a criação de regulamentos de classificação energético de edificações (BAVARESCO; GHISI, 2016). Entre essas etiquetas têm-se a *Passivhaus* na Alemanha, BREEAM no Reino Unido, LEED nos Estados Unidos e ADENE-SCE em Portugal (GUIDETTI, 2016). No Brasil, por intermédio de pesquisas relacionadas ao Procel Edifica, existe desde 2009 o regulamento de etiquetagem para edificações públicas, comerciais e de serviços denominado de RTQ-C (BAVARESCO; GHISI, 2016; TAVARES, 2011).

No RTQ-C, o selo de conformidade é dado em 5 classes de eficiência variando de “A” a “E”, sendo A o mais eficiente e E o menos eficiente. Nos cálculos do desempenho são avaliados os sistemas da envoltória, de iluminação e do condicionamento do ar seja ele artificial ou natural. Por fim, a etiqueta final da edificação é obtida por uma média ponderada de 30, 30 e 40 % das etiquetas parciais obtidas, respectivamente, da envoltória, iluminação e condicionamento de ar (BRASIL, 2013).

Silveira (2014) argumenta que a obtenção de ambientes internos confortáveis termicamente é um dos aspectos fundamentais de um edifício de qualidade e, a obtenção desse parâmetro apenas pelo uso de climatização artificial é uma prática dispendiosa.

Segundo Roriz (2008), um projeto arquitetônico que valorize a harmonia da construção com o clima podem reduzir o dimensionamento do ar condicionado e até torná-los dispensáveis. A utilização de técnicas passivas de climatização são desejáveis, tanto por ocasionar uma diminuição dos impactos ambientais atrelados à produção e distribuição de energia elétrica, quanto pelos custos envolvidos na operação e manutenção de tais equipamentos (BECCALI et al., 2018; LEITE et al., 2019; MANZANO-AGUGLIARO et al., 2015). No caso do Brasil, país de dimensões continentais composto em sua grande maioria por climas quentes e úmidos, o emprego da ventilação natural é uma excelente estratégia de condicionamento passivo, uma vez que essa técnica é recomendada para uso em sete das oitos zonas bioclimáticas brasileiras (ABNT, 2003; CASTAÑO, 2017).

A ventilação natural por ações do vento ocorre quando um fluxo de ar percorre as faces externas de um edifício criando um campo de pressões. Isso permite que o fluxo de ar externo adentre e saia da edificação através de suas aberturas e fissuras e, conseqüentemente, carregue parte da energia térmica acumulada no interior do edifício ocasionando uma diminuição da sua temperatura interna (AFLAKI et al., 2015; CASTAÑO, 2017; MITCHELL; BRAUN, 2018).

Uma das metodologias utilizadas para simulação da ventilação natural é o modelo de rede. Nesse modelo, considera-se a face externa da edificação como uma rede de nós de pressões interligadas por resistências criadas pelas aberturas, que realiza um balanço de massa e conservação de energia (ALBUQUERQUE, 2014). No RTQ-C, a simulação deve ocorrer por um programa com características específicas proposta pelo regulamento, com a disponibilidade de um arquivo climático da cidade ou região similar próxima que possua dados nas 8760 horas do ano da temperatura, umidade do ar, direção e velocidade do ar e da radiação solar (BRASIL, 2013; SILVEIRA, 2014). Posteriormente, a análise é

realizada pelo percentual de horas ocupadas em conforto (POC) que é definido como a razão entre as horas ocupadas em conforto e horas totais de ocupação (BRASIL, 2013).

Os programas de simulação mais utilizados são o *Energy Plus* (ALBUQUERQUE, 2014; BRASIL, 2015; SILVEIRA, 2014) e *Design Builder* (PAULSE, 2016; TAVARES, 2011).

Silveira (2014) estudou as condições de conforto térmico de uma edificação através de simulação de uma edificação unifamiliar de 63m² nas cidades de Curitiba-PR, Campinas-SP e Natal-RN utilizando as condições de conforto proposta pela ASHRAE 55 e NBR 15575. O autor observou que existe deficiência da norma NBR 15575 por não considerar as fontes internas de calor na simulação e, conseqüentemente, obter maiores horas de conforto térmico, quando comparado com a ASHRAE 55.

Tavares (2011) avaliou as condições de conforto térmico de salas de aula localizadas na cidade de Uberlândia-MG com auxílio do programa *Design Builder*. Nas simulações foram consideradas taxas de renovação de ar devido a ventilação natural de forma constante. O autor argumenta que foi possível garantir 63,2% das horas de ocupação em conforto térmico com 18,6% e 18,1% de horas em desconforto devido ao frio e calor, respectivamente. Dentre as dificuldades encontradas pelo autor, destaca-se a criação de um arquivo climático confiável na simulação e na utilização do modelo de rede para avaliação da ventilação natural.

Paulse (2016) estudou as condições de conforto térmico de salas de aula no município de Goiânia-GO variando-se na simulação 24 tipos de envoltória (teto e paredes externas). No projeto inicial, o POC dos ambientes variou entre 58% (pior caso) até 68% (melhor caso). No modelo M19, com mudanças do tipo de parede e teto, ocorreu uma melhoria do POC de 74% a 88% indicando que estudos do conforto térmico ainda na fase de projeto são desejáveis para escolha da alvenaria e posição do edifício. O autor argumenta que o sistema original, utilizado como modelo para construção de escolas públicas na cidade, não é recomendado em termos do desempenho térmico e isso refletirá num maior consumo energético pela edificação.

Nota-se que estudos de conforto térmico com uso da ventilação natural em salas de aula são altamente desejáveis, pois é o ambiente onde os estudantes passam maior parte do seu dia e as condições desses locais podem trazer diversos danos psicológicos e fisiológicos aos seus ocupantes, sendo necessário garantir as condições mínimas de conforto ambiental para um pleno desenvolvimento de suas capacidades cognitivas (LUCAS; DA SILVA, 2017). Como apontado por RORIZ (2008), a ocorrência de acidentes e erros tende a aumentar em mais de 30% acima da média quando a temperatura interna do ambiente se afastam das condições do conforto térmico, ou seja, há uma diminuição nítida do rendimento e eficiência dos seus ocupantes.

O principal objetivo deste trabalho foi analisar o desempenho térmico de um bloco de aulas localizado na cidade de Uberaba-MG através de simulação com o programa *Energy Plus*. A ventilação natural foi modelada a partir de um modelo de rede e variou-se os parâmetros das taxas de ocupação, iluminação e equipamentos elétricos, e na disposição das aberturas de portas e janelas sobre o POC.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

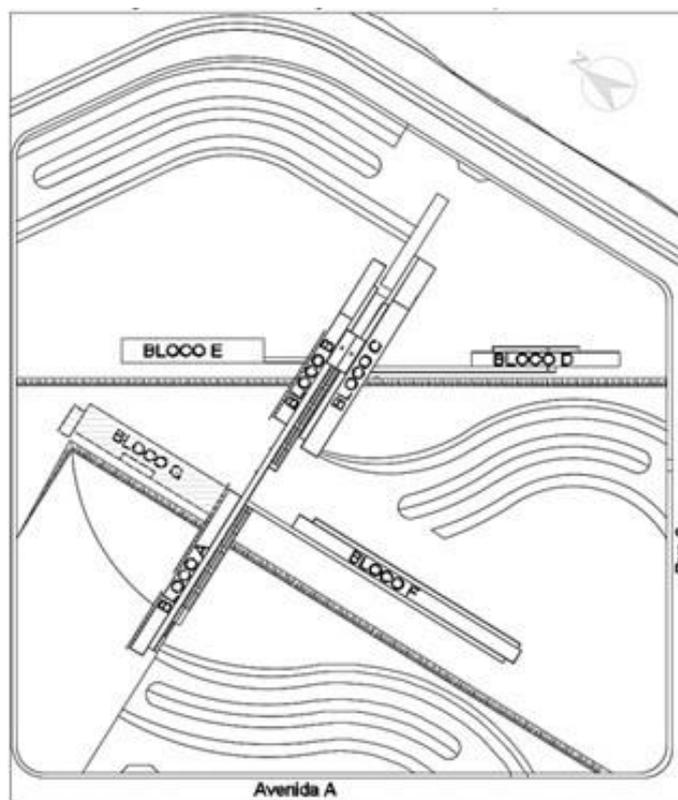
Utilizou-se do programa computacional *Energy Plus*[®] versão 8.4 para análise das temperaturas médias de cada zona térmica da edificação. Para modelagem da ventilação natural empregou-se da lista de classe “*AirflowNetwork*” e da metodologia proposta por Pereira et al. (2013). Os procedimentos metodológicos são divididos em: a) geometria e

elementos da envoltória; b) definição das cargas térmicas internas; c) parâmetros de transporte da ventilação natural; d) dados climáticos e condições de conforto térmico adaptativo; e) formas de análise dos resultados; e f) casos simulados.

Definição geométrica e dados da envoltória

O edifício de estudo é o bloco C do Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas (ICTE) que está localizado nas dependências do campus Univerdecidade da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, na cidade de Uberaba-MG. O edifício é composto de 21 ambientes sendo seis laboratórios, dos quais três de informática, e de 15 salas de aulas distribuídas em 3 pavimentos. A **Figura 1** apresenta uma vista superior desse bloco de aulas inserido dentro do campus com suas maiores fachas orientadas nas direções norte e sul, enquanto a **Figura 2** proporciona vistas das faces sul e leste (à esquerda) e parcialmente do último andar na face norte com as principais janelas e portas das salas (à direita).

Figura 1. Localização do bloco C dentro do campus Univerdecidade da UFTM



Fonte: Guidetti, 2016

O bloco apresenta 73,6 metros de comprimento, 8,3 m de largura e 10,2 m de altura. Cada ambiente desse bloco possui 2 janelas de correr na face exterior voltadas para o sul com dimensões de 1,07m x 5,0m cada, 2 janelas de correr no corredor de acesso com dimensões de 0,67m x 3,6m cada e duas portas de madeira com 2,1m x 0,9m cada uma. Exceções ocorrem nas salas C101, que possui uma porta de acesso maior composta de material metálico; e a sala C103 que faz divisa com uma sala de armazenagem e, conseqüentemente, possui apenas uma porta de acesso.

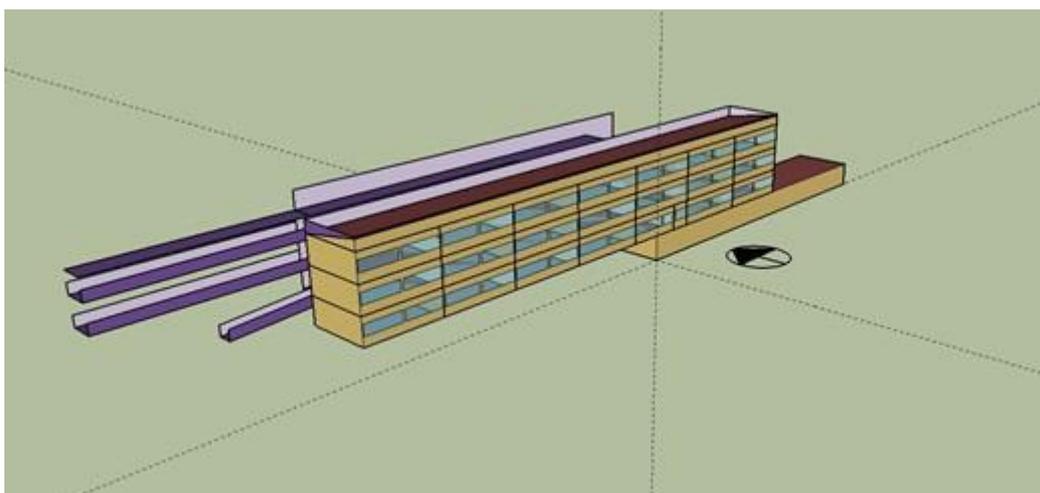
Para definição da geometria da construção e dos ambientes analisados, utilizou-se do projeto arquitetônico fornecido pela prefeitura universitária do campus junto com a realização de um “*As Built*” desenvolvido durante este trabalho.

Figura 2. Vistas externas das faces sul (à esquerda) e da face norte no último andar (à direita)



A **Figura 3** apresenta o modelo do Bloco C com as definições geométricas da envoltória, das 21 zonas térmicas, sendo 7 zonas por andar, e as fachadas de sombreamento das construções do entorno (em roxo). Desenvolveu o modelo geométrico no programa *SketchUP 15*[®] com *plugin Legacy OpenStudio*[®]. Neste modelo, as salas C101 a C107 estão localizadas no andar térreo, sendo a sala C101 mais a leste e a C107 mais a oeste. As salas C201 a C207 e C301 a C307 seguem o mesmo padrão anterior, porém estão no segundo e terceiro pavimento, respectivamente.

Figura 3. Modelo do bloco C – Fachada Sudoeste



As paredes das faces sul, leste e oeste da edificação apresentam uma espessura total de parede de 25,0 cm, e as das faces norte e no interior do edifício uma dimensão total de 15,0 cm. Elas são compostas por duas camadas (interna e externa) de 2,5 cm de

argamassa, perfazendo uma espessura de 5,0 cm, e de bloco cerâmico de 6 furos com dimensão total de 20,0 cm ou 10,0 cm quando deitado ou em pé, respectivamente.

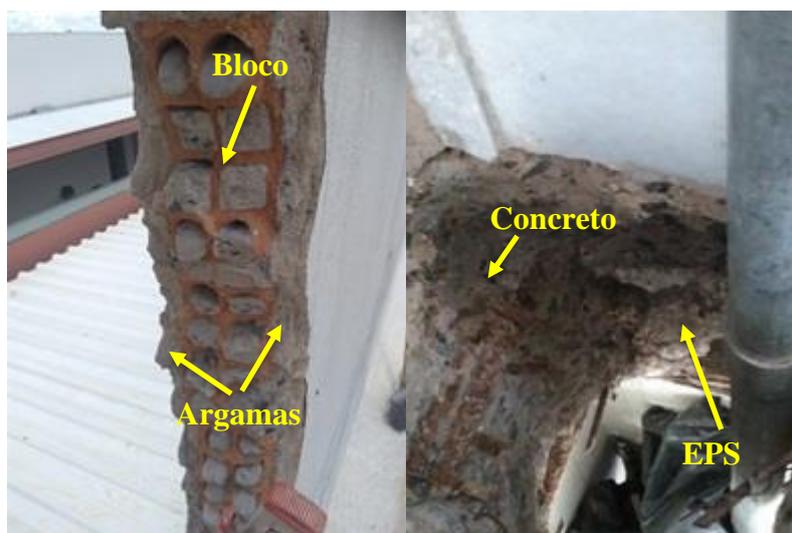
As lajes apresentam espessura total de 25,0 cm sendo composta por 15,0 cm de concreto, 10 cm de material isolante acústico-térmico (EPS) e uma fina camada de gesso. Todas estas composições foram adquiridas no local em aberturas pré-existentes durante visita técnica a construção. A **Figura 4** proporciona vistas de aberturas na parede de 15,0 cm, à esquerda, e da laje, à direita.

O forro foi modelado com inclinação de 15,8%, altura máxima de 1,3 m alinhado na face sul e cobertura de fibrocimento com espessura de 8,0 cm.

Na falta de dados sobre o vidro das janelas, supôs que sejam vidro simples com espessura de 0,8 cm, que fornecem uma transmitância térmica total de 6,01 W/m²K (CREDER, 2012) e fator solar de 0,87 (FROTA; SCHIFFER, 2001).

Para absorvância das paredes, foi adotado um valor de 0,3 para as faces claras levemente desgastadas do exterior do bloco e de 0,4 para as telhas de fibrocimento de coloração clara.

Figura 4. Visualização da composição na parede de 15 cm (esquerda) e laje da edificação (direita)



A **Tabela 1** proporciona uma compilação das principais propriedades termofísicas e dimensões dos materiais da envoltória. Nessa tabela, as propriedades térmicas do EPS, câmara de ar e do vidro não foram inseridas, existindo apenas, o valor de suas espessuras e das transmitâncias térmicas finais para os elementos opacos e translúcido.

Tabela 1. Principais propriedades termofísicas e dimensões dos materiais utilizados na simulação

Componente Construtivo	Material	Espess (m)	Cond. Térmica (W/mK)	Dens. (kg/m ³)	Calor Específico (j/kgK)	Transmit. Térmica (W/m ² K)	Absor t. (α)
Superfícies Opacas							
Parede 15 cm	Argamassa	0,050	1,15	2000	1000	--	0,3
	Tijolo cerâmico	0,036	0,90	1600	920	--	--
	Câmara de ar	--	--	--	--	0,283	--
Parede 25 cm	Argamassa	0,050	1,15	2000	1000	--	0,3
	Tijolo cerâmico	0,070	0,90	1600	920	--	--
	Câmara de ar	--	--	--	--	0,564	--
Laje 25 cm	Forro Gesso	0,001	0,35	900	870	--	--
	Concreto	0,150	1,15	2200	1000	--	--
	EPS	0,100	--	--	--	2,500	--
Cobertura	Fibrocimento	0,080	0,95	1900	840	--	0,4
Porta madeira	Madeira	0,025	0,14	600	1600	--	--
Porta Metálica	Aço	0,001	55,00	7800	460	--	--
Superfícies Translúcidas							
Janela	Vidro	0,008	--	--	--	6,01	0,87

Fontes: ABNT, 2005; Creder, 2012; Frota e Schiffer, 2001

Cargas térmicas internas

As cargas térmicas internas representam a geração ou dissipação de calor que ocorrem no interior da zona térmica. Elas podem ser classificadas conforme sua origem em pessoas, de iluminação e de equipamentos elétricos.

Para carga térmica de pessoas adotou-se uma taxa de dissipação de 130W por indivíduo, que representa um gasto energético médio de uma pessoa em trabalho leve de escritório (ABNT, 2008).

Avaliou-se que todos os ambientes possuem luminárias de teto com duas lâmpadas fluorescentes de 28W com eficiência de 80%, que representa uma taxa de calor de 70W por luminária. Relacionado aos equipamentos elétricos foram obtidos em cada ambiente a quantidade e suas potências e eram compostos em sua maioria por microcomputadores de mesa, monitores, televisores, projetores e *notebook*.

A **Tabela 2** apresenta essas cargas térmicas por tipo e ambiente na sua máxima taxa de dissipação. Observa-se nessa tabela, que os ambientes C107 a C307 apresentam os mesmos valores por se tratar de salas de aulas com perfis similares. Nas zonas térmicas C102 a C104, por serem laboratórios de informática, as maiores taxas de equipamentos elétricos referem-se a presença dos microcomputadores e seus periféricos.

Para simplificação da simulação, que ocorrem em base horária, supôs que o padrão de ocupação desses ambientes seja das 7:00 às 12:00, das 13:00 às 18:00 e das 19:00 até às 22:00 e que ocorra somente nos dias úteis da semana de janeiro a dezembro.

Tabela 2. Cargas térmicas máximas por tipo (pessoas, iluminação e equipamentos elétricos por ambiente) e ambiente

Ambiente	Cargas térmicas		
	Pessoas (W)	Iluminação (W)	Equipamentos Elétricos (W)
C101	2990	560	1000
C102	6630	560	6375
C103	4550	420	4375
C104	6500	560	6250
C105	6500	560	3125
C106	3900	630	1375
C107	7800	630	125
C201	7800	630	125
C202	7800	630	125
C203	7800	630	125
C204	7800	630	125
C205	7800	630	125
C206	7800	630	125
C207	7800	630	125
C301	7800	630	125
C302	7800	630	125
C303	7800	630	125
C304	7800	630	125
C305	7800	630	125
C306	7800	630	125
C307	7800	630	125

Parâmetros de transporte da ventilação natural

Para cálculos da taxa de ventilação no interior dos ambientes é necessário estimar as pressões na superfície externa da edificação e as resistências dinâmicas ao escoamento nas aberturas e/ou nas frestas das superfícies de fenestração.

A estimativa dos coeficientes de pressão do vento é calculada pelo programa *Energy Plus®* com o uso da classe “*AirflowNetWork: SimulationControl*” sendo utilizado a correlação proposta por Swami e Chandra (1988, apud PEREIRA *et al.*, 2013) e uma razão de aspecto entre largura e comprimento da edificação de 0,112. Nestes cálculos, supôs que as edificações e obstruções próximas não influenciem a velocidade e direção dos ventos presentes no arquivo climático e, conseqüentemente, nas correlações dos coeficientes de pressão proposta por essa metodologia.

Foram consideradas duas situações para as resistências dinâmicas ao fluxo do ar através das janelas e portas.

Na primeira situação, elas encontram-se fechada e o fluxo do ar ocorre por suas frestas sendo necessário estimar os coeficientes de descarga (adimensional), o expoente de fluxo (adimensional) e seu respectivo coeficiente de fluxo (kg/s.m).

No segundo caso, as portas e janelas estão abertas e o fluxo do vento ocorre pela área útil de ventilação. Nesta situação são necessários definir o coeficiente de descarga e

a porcentagem da área útil de ventilação.

A **Tabela 3** fornece as duas condições possíveis das aberturas (aberta ou fechada) e seus respectivos parâmetros de transporte dados para a porta de madeira, janelas exteriores e do corredor. Considera-se como janela exterior 1 a que se encontra voltada para o sul mais próxima ao leste, enquanto a janela do corredor 1 segue posicionamento similar, porém na face norte, **ver Figura 2**.

Deve-se ressaltar, que para o ambiente C103, as janelas exterior e do corredor 1 estarão sempre fechadas devido a presença da sala do *rack* do servidor.

Tabela 3. Parâmetros físicos para perda de carga e de transporte das fenestraçãoes

Condição	Parâmetro	Tipo de abertura				
		Porta Madeira	Janela exterior 1	Janela exterior 2	Janela Corredor 1	Janela corredor 2
Fechada	Coeficiente de fluxo (kg/s.m)	0,001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
	Expoente de fluxo	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
	Coeficiente de descarga	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Aberta	Coeficiente de descarga	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	% Área útil de ventilação	100%	38,8%	40,9%	38,5%%	35,7%

Dados climáticos e condições do conforto térmico adaptativo.

A simulação foi realizada para a cidade de Uberaba-MG, zona bioclimática 3, utilizando o arquivo climático TMY do aeroporto Almeida Franco e disponível na página eletrônica do Laboratório de Eficiência Energética da Universidade Federal de Santa Catarina¹. Nesse arquivo estão dispostas em base horária as temperaturas de bulbo seco e úmido, taxas de irradiação solar, nebulosidade e outros dados de entrada necessários para a simulação de um ano típico meteorológico obtidos do período de 2003 a 2017.

Humphreys (1976) propõe que a condição de conforto térmico adaptativo dependa da temperatura média do local de estudo. Dentro dessa hipótese e utilizando-se os conceitos propostos por Dear e Brager (ASHRAE 55, 2010), a temperatura operativa de conforto térmico é proposta pela equação 1 (BRASIL, 2015).

$$T_{op,c} = 18,9 + 0,255T_{m,ext} \quad (1)$$

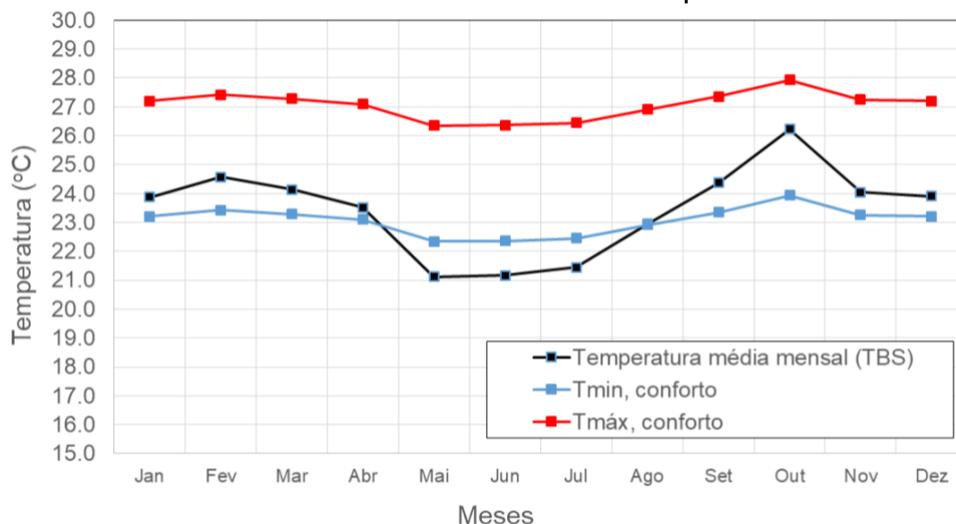
Sendo $T_{op,c}$ a temperatura operativa de conforto e $T_{m,ext}$ a temperatura média mensal externa, ambas em °C. Para definir a zona de conforto com uma aceitabilidade de 90% é adicionado 2,5°C e subtraído 2,2°C da temperatura operativa para definir, respectivamente, as temperaturas máximas e mínimas de conforto de cada mês.

A **Figura 4** exhibe as temperaturas médias e a zona de conforto adaptativo ao longo

¹ <http://www.labeec.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2018>, acessado em 22/04/2020.

dos meses do ano. Percebe-se nessa figura que os meses de maio e junho possuem as menores temperaturas médias do ano. Nesta situação, adota-se que as portas e janelas somente estarão abertas quando a temperatura interna do ambiente for maior ou igual a 22,1°C.

Figura 4. Variação da temperatura média mensal ($T_{m,ext}$) e das temperaturas máximas e mínimas de conforto térmico adaptativo



Formas de análise dos resultados

O percentual de horas ocupadas em conforto (POC) é definido como a razão entre as horas ocupadas com a comprovação de conforto, no caso por simulação, e as horas totais ocupadas (BRASIL, 2013). Este é um parâmetro utilizado RTQ-C para avaliar a eficácia no uso da ventilação natural.

A simulação ocorreu durante as 8760 horas do ano, entretanto, em somente 3380 horas o edifício está ocupado. Quando a temperatura do ambiente interno estiver com sua temperatura superior a máxima temperatura de conforto, ele é considerado desconfortável devido ao calor, enquanto se estiver com temperatura abaixo, o ambiente será desconfortável por causa do frio. Caso contrário, a sala ocupada estará dentro dos parâmetros do conforto adaptativo.

Casos simulados

Foram realizadas duas sequências de simulações. Uma para avaliar a influência das cargas térmicas internas no POC e na outra a influência do fechamento de portas e janelas na ventilação natural.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na primeira sequência de simulação é avaliado o impacto das cargas térmicas internas no POC. Inicialmente, é analisado o conforto térmico dos ambientes sem (S_v) e (C_v) com a possibilidade da ventilação natural máxima, porém sem uso das cargas térmicas internas. Posteriormente, são adicionadas as cargas térmicas devido a equipamentos e

iluminação e, frações de taxas de ocupação variando de 25% a 100%. A **Tabela 4** apresenta os valores do POC por ambiente em função das cargas térmicas internas dessas simulações.

Tabela 4. Avaliação da ventilação natural dos ambientes em função de suas cargas térmicas internas

Ambiente	POC (%)						
	Estrutura		Carga térmica de equipamentos e de iluminação em 100%. Variações da carga térmica de pessoas.				
	Sv	Cv	0%	25%	50%	75%	100%
C101	44,6	54,8	50,1	49,8	48,9	48,4	47,7
C102	37,6	56,1	32,9	31,1	29,6	27,5	25,8
C103	34,5	57,0	31,0	29,2	27,2	25,2	22,5
C104	40,3	56,2	33,3	31,7	30,0	28,0	26,2
C105	45,7	58,7	45,9	44,4	42,1	40,5	38,7
C106	47,7	59,0	49,5	49,3	49,0	48,5	48,3
C107	54,1	56,3	52,1	50,8	50,9	50,2	49,1
C201	40,0	53,6	51,2	50,4	50,5	50,3	49,4
C202	31,4	54,7	51,2	50,7	50,6	50,4	49,3
C203	28,6	54,4	51,4	50,7	50,8	50,4	49,1
C204	29,9	54,9	51,4	50,7	50,8	50,6	49,3
C205	33,3	55,5	51,4	50,8	50,8	50,7	49,4
C206	34,6	55,7	51,5	50,8	50,8	50,9	49,4
C207	42,7	54,2	51,2	50,4	50,2	50,2	49,5
C301	40,3	52,9	51,2	50,1	50,4	50,0	50,3
C302	32,5	54,1	51,1	50,1	50,4	50,4	50,4
C303	31,4	54,4	51,0	50,1	50,4	50,7	50,4
C304	31,9	54,3	51,1	50,0	50,5	50,7	50,3
C305	32,5	54,3	51,1	50,1	50,4	50,7	50,4
C306	33,1	54,5	51,2	50,1	50,4	50,7	50,4
C307	41,1	53,2	51,1	50,1	50,3	50,1	50,0

SV- sem ventilação (ventilação somente por frestas).

CV- com ventilação (Ventilação através das aberturas).

Nota-se dessa tabela, comparando a estrutura sem ventilação ou com ventilação natural, mas sem as cargas térmicas internas, percebe-se uma melhoria do POC em todos os ambientes quando é possível que ocorra abertura das portas e janelas. No ambiente C20 e ocorre uma melhoria de até 25,7% das horas em conforto quando analisado os dois casos e é explicado pelo aumento da taxa de renovação do ar. Nas salas com maiores áreas expostas para o ambiente externo (C101, C107, C201, C207, C301 e C307) o aumento do POC é ligeiramente menor quando comparado aos demais ambientes, principalmente na sala C107. Isso pode ser explicado pela inércia térmica do fluxo de energia pelas paredes, que servem como amortecedores da variação da temperatura interna das zonas. Na sala C107, esta variação é também amortecida pelo contato da zona térmica com o solo.

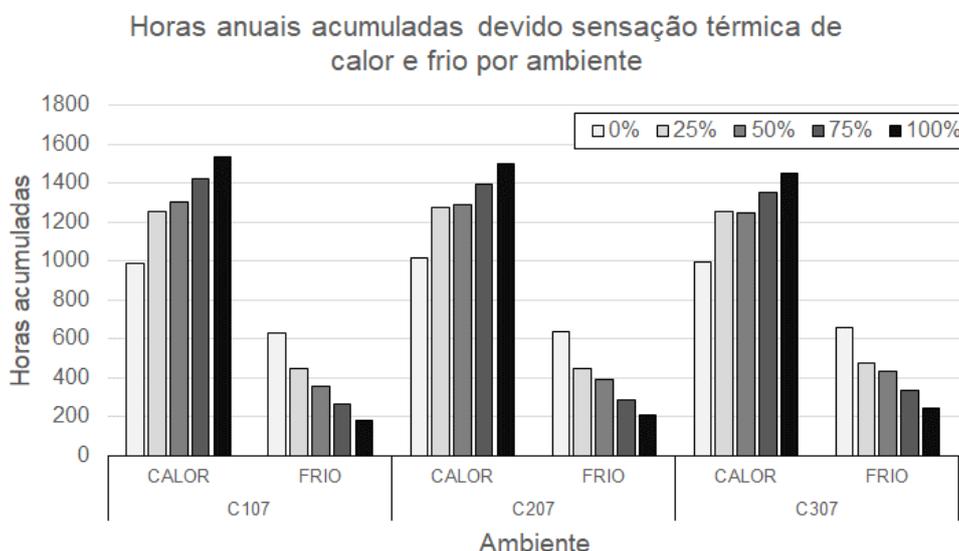
Ainda analisando a **Tabela 4** e comparando o POC dos ambientes da estrutura Cv e

com as cargas térmicas de equipamentos e iluminação (0%), nota-se um decaimento das condições de conforto em todos os ambientes. Esse decaimento é maior nos ambientes C102 a C104 devido as elevadas taxas de dissipação de calor provenientes dos dispositivos elétricos, ver **Tabela 2**.

Modificando-se a taxa de ocupação de pessoas nos ambientes, percebe-se na maioria das salas um decaimento das condições de conforto térmico com o aumento do número de pessoas. Em alguns casos, ocorre um acréscimo do POC com estabilização desse valor ou um posterior decaimento, como exemplo, tem-se as salas C201 e 204. Este efeito advém que o número de horas de desconforto devido a sensação de frio tenderem a diminuir com o aumento da taxa de ocupação, enquanto o número de horas com temperatura interna superior ao limite máximo propende a aumentar. Em outros casos, a quantidade de horas inferior ao limite mínimo que passam para a zona de conforto são maiores das que saem da zona de conforto e adentram na região onde as temperaturas ocasionam a sensação de calor.

A **Figura 5** apresenta as horas acumuladas devido ao desconforto térmico para os ambientes C107, C207 e C307 em função da taxa de ocupação de pessoas. Observa-se nessa figura, um aumento do número de horas devido a sensação de calor com o incremento do número de pessoas em cada ambiente. Inversamente, ocorre uma diminuição do número de horas no qual a temperatura interna está abaixo da temperatura inferior de conforto.

Figura 5. Horas acumuladas devido ao desconforto térmico nas salas C107, C207 e C307 para taxas de ocupação de 0, 25, 50 e 100% da capacidade total



Deve-se ressaltar, que os resultados da **Tabela 4** e **Figura 5** colaboram com os argumentos propostos por Silveira (2014), onde o uso ou não das cargas térmicas internas interferem de forma significativa nas condições de conforto térmico. Caso a ventilação natural do bloco C fosse analisado segundo as normas do RTQ-C, na situação Cv todos os ambientes obteriam etiqueta D ($50\% \leq \text{POC} < 60\%$), entretanto, na situação do uso de 100% das cargas térmicas internas, somente 7 ambientes estariam com a etiqueta D enquanto 14 ambientes restantes decairiam para a etiqueta de nível E ($\text{POC} < 50\%$).

Isso indica que as análises do POC para etiquetagem de edifícios através da

metodologia do RTQ-C devam ser realizadas com as cargas térmicas internas no seu valor máximo, que é o pior caso possível de ocorrer. Outro ponto a destacar, a partir desses resultados, é o cuidado que gestores devem ter ao inferir no número máximo de alunos em cada ambiente sem antes avaliar as taxas de ocupação sugeridas no projeto.

Na segunda sequência de simulações investiga-se seis possibilidades de aberturas de portas e janelas, enquanto algumas sempre seriam mantidas fechadas. As cargas térmicas de iluminação e de equipamentos elétricos estão em 100% e a taxa de ocupação em 75%.

A **Tabela 5** proporciona as situações possíveis das aberturas, da maior área útil de ventilação na fachada norte ou sul (A_{maior}), e a razão entre a menor área útil de abertura sobre a maior área útil (AR). O caso 0, ou de referência, é o mesmo apresentado na Tabela 4 com 75% de ocupação. Nesse estudo foram consideradas apenas as salas de aulas C107 a C307 por apresentarem perfis similares da disposição das aberturas e das cargas térmicas internas.

Tabela 5. Configurações de aberturas de janelas e portas para avaliação do impacto na ventilação natural

Caso	Situação	A_{maior} (m ²)	AR
0	Todas as janelas e portas podem ser abertas	5,50	0,98
1	Janelas exteriores 1 e 2 sempre fechadas	5,50	--
2	Janelas do corredor 1 e 2 sempre fechadas	5,42	0,68
3	Portas de madeiras sempre fechadas	5,42	0,34
4	Janelas do corredor 1 e 2 e uma das portas de madeira sempre fechadas	5,42	0,34
5	Somente janela 1 do exterior e uma das portas de madeira com possibilidade de abertura, as demais fechadas.	2,71	0,68
6	Todas as janelas e portas fechadas.	--	--

A **Tabela 6** fornece o POC dos ambientes C107 a C307 utilizando-se as configurações apresentadas na **Tabela 5**.

No Caso 6, onde todas as portas e janelas encontram-se fechadas e a ventilação ocorre apenas pelas frestas, não é possível obter conforto térmico em nenhum momento de ocupação. Isso demonstra que essa ventilação não permite taxas de renovação de ar suficiente para dissipar o calor acumulado.

O caso 1, com janelas do exterior fechadas, o POC decai em média 21% quando comparado ao caso de referência, sendo que as maiores quedas ocorrem nas salas localizadas no centro do bloco. Isso advém devido à falta da ventilação cruzada que proporciona maior eficácia da ventilação natural.

No caso 2, onde as janelas 1 e 2 do corredor estão fechadas, ocorre uma ligeira diminuição do POC, menor que 1%, quando comparado com o caso 0. Percebe-se neste caso, embora ocorra uma diminuição da área útil de ventilação na face norte, isto não interfere significativamente na ventilação cruzada.

Tanto no caso 3 e 4, ocorre uma perda moderada nas condições de conforto térmico nos ambientes, em média de 5,7%, em ambos os casos quando comparados com o caso

de referência. Percebe-se nessa situação uma semelhança entre a maior área de abertura numa fachada (A_{maior} é igual a $5,42\text{m}^2$) e AR (0,34).

Quando se analisa o caso 5 com a referência, nota-se um decréscimo significativo do POC em média de 11,5%. Observa-se que embora esse caso apresente o mesmo AR do caso 2, a maior área útil de fachada para ventilação é 50% menor e isso ocasiona uma diminuição significativa do potencial de uso da ventilação cruzada

Das seis situações simuladas, somente o caso 2 apresentou leve redução das condições de conforto dos ambientes. No caso 3 e 4 ocorre uma redução moderada de conforto não sendo aconselhado a sua utilização, o mesmo ocorre com os casos 1, 5 e 6.

Tabela 6. Impacto da configuração das aberturas de portas e janelas no POC das salas de aula

Ambiente	POC (%)						
	CASO						
	0	1	2	3	4	5	6
C107	49,1	33,8	49,0	45,4	45,3	39,1	0,0
C201	49,4	30,0	49,4	45,0	45,1	39,1	0,0
C202	49,3	27,1	48,9	43,6	43,6	35,7	0,0
C203	49,1	25,9	48,9	42,9	43,2	35,3	0,0
C204	49,3	26,4	48,8	43,1	43,3	35,6	0,0
C205	49,4	27,4	49,1	43,7	43,8	36,3	0,0
C206	49,4	28,3	49,2	44,0	44,0	37,0	0,0
C207	49,5	30,9	49,6	45,5	45,3	39,3	0,0
C301	50,3	30,0	49,8	45,9	46,3	41,2	0,0
C302	50,4	28,6	50,3	45,5	45,2	39,0	0,0
C303	50,4	28,0	50,2	44,9	45,1	38,8	0,0
C304	50,3	28,0	50,3	44,9	45,2	38,9	0,0
C305	50,4	28,2	50,3	44,8	45,2	38,9	0,0
C306	50,4	28,5	50,4	45,0	45,1	39,1	0,0
C307	50,0	31,0	49,9	46,3	46,4	41,2	0,0

Deve-se ressaltar pelos resultados apresentados nas **Tabelas 5 e 6**, que embora a ventilação natural possa manter os ambientes climatizados em pelo menos 40% do seu tempo de ocupação, é necessário o uso de sistemas de climatização artificiais no tempo restante. Essa necessidade é ainda maior nos ambientes C102 a C104 por apresentarem POC inferiores a 30%.

CONCLUSÕES

A partir dos resultados das simulações, observa-se na melhor configuração da ventilação natural e pior taxa das cargas térmicas internas, que dos 21 ambientes analisados, somente 7 deles obteriam etiqueta nível D e os demais teriam etiqueta nível E.

Os dados colaboram na necessidade de uso de sistemas artificiais de climatização para garantir as condições de conforto térmico ao longo de todo o ano quando isso não é possível apenas com a ventilação natural.

Relacionado às cargas térmicas internas, nota-se que seu uso influencia significativamente os resultados do POC podendo decair o nível de eficiência da ventilação natural em até 1 etiqueta. Isso ocorre por uma maior concentração de energia nos ambientes que não é removido apenas pela renovação do ar. Nesse sentido, aconselha-se que as simulações para avaliação do POC sejam realizadas com as cargas térmicas internas na sua máxima taxa, ao invés, da análise das condições da estrutura com uso da ventilação natural.

Pertinente às configurações de aberturas de portas e janelas, não é aconselhável o fechamento das aberturas das salas quando estas possuam 75% ou mais da sua ocupação máxima devido a sensação térmica dos ocupantes de calor em 100% do tempo. Em menor escala, não é recomendado o fechamento total das janelas do exterior ou somente o uso de uma das janelas do exterior e uma das portas abertas, pois a redução do POC poderá ser de até 23,2%.

Devido à necessidade do uso de sistemas de climatização artificiais nos espaços analisados e emprego racional da energia em edifícios públicos, sugere-se para trabalhos futuros os seguintes temas:

- Avaliar diferentes técnicas e de sistemas de climatização artificiais, tais como resfriamento por compressão de vapor, ventilação mecânica com ou sem uso do resfriamento evaporativo e seu impacto no consumo energético do edifício;
- Analisar a influência da tipologia arquitetônica e de diferentes tipos de envoltória para melhoria do POC;
- Levantar o nível de etiqueta dos sistemas da envoltória, iluminação e total do edifício segundo a metodologia proposta pelo RTQ-C.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220 partes I a V**. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Desempenho Térmico de Edificações. **NBR 15.220**, p. 30, 2005.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas.. **NBR 16401 I, II e III**. Rio de Janeiro, 2008.

AFLAKI, A.; MAHYUDDIN, N.; MAHMOUD, Z. A.; BAHARUM, M. R. A review on natural ventilation applications through building façade components and ventilation openings in tropical climates. **Energy and Buildings**, v. 101, p. 153–162, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.033>.

ALBUQUERQUE, P. D. **Simulação Computacional de um Sistema de Ventilação Natural para uma Torre de Escritórios em Lisboa**. Simulação Computacional de um Sistema de Ventilação Natural para uma Torre de Escritórios em Lisboa. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente) - Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2014.

ASHRAE 55. **Standard 55 - Thermal Conditions for Human Occupancy**. Atlanta, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.1007/0-387-26336-5_1680.

BAVARESCO, V. M.; GHISI, E. **Métodos de avaliação de eficiência energética por consumo global e energia primária**. Florianópolis, 2016. Disponível em: http://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/downloads/201602_Bavaresco_Ghisi.pdf.

BECCALI, M.; STRAZZERIB, V.; GERMANÀ, M. L.; MELLUSO, V.; GALATIOTO, A. Vernacular and bioclimatic architecture and indoor thermal comfort implications in hot-humid climates: An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1726–1736, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.062>.

BRASIL. ELETROBRÁS. **Avaliação do mercado de eficiência energética do Brasil - sumário executivo - ano base 2005. Avaliação do mercado de eficiência energética do Brasil**. Brasília, 2007. 77 p.

BRASIL. ELETROBRÁS /PROCEL. **Manual para Aplicação do RTQ-C 4.1**. Brasília, 2013. 213 p.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Balço Energético nacional 2016: Ano base 2015**. Brasília: MME, 2016. 61 p.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Memorial de simulação e relatório das propriedades térmicas - Parte 2**. Brasília: MMA, 2015. 76 p. Disponível em: http://www.mma.gov.br/images/arquivos/clima/energia/edificios/retrofit/Parte_2_simulacao.pdf

CASTAÑO, H. F. M. **Impacto de dispositivos de sombreamento externos e muro na ventilação natural e no desempenho térmico de uma habitação de interesse social térrea**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

CREDER, H. **Instalações de ar condicionado**. 6. ed. Rio de Janeiro, 2012. *E-book*.

DE VECCHI, R. **Condições de conforto térmico e aceitabilidade da velocidade do ar em salas de aula com ventiladores de teto para o clima de Florianópolis/SC**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto Térmico**. 5. ed. São Paulo: Nobel, Studio, 2001. *E-book*.

GUIDETTI, G. E. C. B. **Estudo de climatização por compressão à vapor e resfriamento evaporativo no restaurante universitário do ICTE-UFTM**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2016.

HUMPHREYS, M. Field studies of thermal comfort compared and applied. **Journal of the Institution of Heating and Ventilating Engineers**, v. 44, p. 176–180, 1976.

LEITE, L. M. *et al.* Desenvolvimento de banco de dados para o programa SOL-AR a partir de dados climáticos INMET 2016. *In: IV WIPEX*, São Carlos: IFSC, 2019. p. 8–11.

LUCAS, R. E. C.; DA SILVA, L. B. Conforto ambiental em sala de aula: análise da percepção

térmica dos estudantes de duas regiões e estimação de zonas de conforto. **Revista Produção Online**, v. 17, n. 3, p. 804, 2017. DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v17i3.2547>.

MANZANO-AGUGLIARO, F.; MONTOYA, F. G.; SABIO-ORTEGA, A.; GARCÍA-CRUZ, A. Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 736-755, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.095>.

MITCHELL, J. W.; BRAUN, J. E. **Princípios de aquecimento, ventilação e condicionamento de ar em edificações**. 1a. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018. *E-book*.

PAULSE, P. de C. **Análise do desempenho termoenergético de escolas públicas segundo aplicação do RTQ-C para a envoltória**. Dissertação (Mestrado em Projeto e Cidade) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

PEREIRA, H. A. da C. *et al.* Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa EnergyPlus. *In: Florianópolis: [s. n.], 2013. p. 56. E-book.*

RORIZ, M. Conforto térmico em edificações. *In: II Fórum Pró-Sustentabilidade*. Novo Hamburgo, 2008. 63 p.

SILVEIRA, F. M. **Análise Do Desempenho Térmico De Edificações Residenciais Ventiladas Naturalmente: NBR15575 E ASHRAE 55**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Arquitetura) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2014.

TAVARES, L. R. **Eficiência Energética em Edificações: aplicação do RTQ-C – Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos - na cidade de Uberlândia-MG**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

Recebido em: 29/08/2020

Aprovado em: 27/08/2021