

Análise do desempenho lumínico e térmico de apartamentos *studio* nos cenários climáticos atual e futuro na cidade de São Paulo

Analysis of the luminous and thermal performance of *studio* apartments in current and future climate scenarios in the city of São Paulo

¹Bianca Milani de Quadros, ²Pascual Ceriani, ³Shaiane Viana, ⁴Samuel Bertrand, ⁵Denise Helena Silva Duarte

¹Doutoranda no Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo – Universidade Federal de Santa Catarina (bianca.milani@posgrad.ufsc.br)

²Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo – Universidade Federal de Santa Catarina (cerianipascual@gmail.com)

³Mestranda no Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (shaiane@usp.br)

⁴Doutorando no Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (samuelnazareth@usp.br)

⁵Professora Titular do Departamento de Tecnologia da FAUUSP, Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (dhduarte@usp.br)

RESUMO: O adensamento e verticalização urbana impactam em transformações no desempenho das edificações. O presente artigo tem como objetivo avaliar o desempenho térmico e lumínico de apartamentos do tipo *studio* face à estimativa do aumento de temperatura do RCP8.5 para a cidade de São Paulo/SP. Para isto, foi realizado um estudo de caso em um edifício com apartamentos *studio* construído recentemente. Por meio dos softwares *Grasshopper* e *EnergyPlus*, foram simulados quatro cenários: o primeiro com a condição existente edificada considerando o clima atual, um segundo hipotético na condição verticalizada com clima atual, um terceiro com a condição existente considerando clima futuro e um último na condição verticalizada com clima futuro. A avaliação do desempenho térmico e lumínico tem como critério os parâmetros das normas LM-83-12 e NBR15.575. Os resultados demonstram que, apesar da verticalização, a iluminância dos ambientes internos em todos os apartamentos atende à norma LM-83-12 e atinge o nível de desempenho superior da norma NBR15.575. Com relação ao desempenho térmico, o sombreamento do entorno imediato sobre a edificação diminui o tempo de exposição da envoltória à radiação solar direta, resultando em uma redução da temperatura máxima no interior da edificação de 2,6°C. Apesar disto, a redução da temperatura máxima não foi suficiente para o atendimento do nível de desempenho térmico mínimo exigido pela NBR15.575. Destaca-se ainda que o efeito mais significativo da mudança climática ocorre pela elevação das temperaturas mínimas do ar interno nos *studios* analisados, com aumento de até 7°C nos casos simulados com arquivo climático futuro.

Palavras Chave: Mudanças climáticas. Desempenho térmico e lumínico. Edifício residencial.

ABSTRACT: Urban densification and verticalization impact changes in the building's performance. This article aims to evaluate the thermal and natural lighting performance of studios according to the estimated increase in temperature of RCP8.5 for the city of São Paulo/SP. To this end, a case study was carried out in a recently constructed building with studio apartments. By using *Grasshopper* and *EnergyPlus* software, four scenarios were simulated: the first one with the existing built condition considering the current weather condition, a second considering a hypothetical verticalized condition with the current weather condition, a third with the existing condition considering the weather condition, and a last in the hypothetical verticalized condition with the weather condition. The thermal and lighting performance assessment are based on the parameters of standards LM-83-12 and NBR15.575. The results demonstrate that, despite verticalization, the internal environment illuminance of all apartments meets the LM-83-12 standard and reaches the superior performance level of the NBR15.575 standard. Concerning thermal performance, shading the immediate surroundings of the building reduces the exposure time of the surroundings to direct solar radiation, resulting reduction in the maximum temperature inside the building by 2.6°C. Despite this, the reduction in maximum temperature was not sufficient to meet the minimum level of thermal performance required by NBR15.575. It is also worth highlighting that the most significant effect of climate change occurs through the increase in minimum indoor air temperatures in the analyzed studios, with an increase of up to 7°C in cases simulated with a future climate archive.

Keywords: Climate change. Thermal and natural lighting performance. Residential building.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Organização das Nações Unidas (DESA, 2019) atualmente 55% da população mundial vive em áreas urbanas e a expectativa é de que esta proporção aumente para 70% até 2050. Essa população urbana é responsável pelo maior consumo em torno da energia global e produz mais de 73% das emissões mundiais de gases do efeito estufa (GE et. al., 2020). Conforme as emissões foram aumentando na última década, a crise climática se estabeleceu e, como consequências diretas ou indiretas, inúmeras catástrofes naturais começaram a ocorrer no mundo. Fenômenos naturais como ciclones, tempestades e queimadas tem se intensificado provocando incontáveis prejuízos à humanidade.

Com um recorte específico na cidade de São Paulo, situada na latitude 23° 33' 01" Sul e na longitude 46° 38' 02" Oeste, ela apresenta o clima típico das regiões subtropicais do Brasil. De acordo com os dados climáticos *INMET 2016* (LABEEE, 2019), nos meses de verão a temperatura média mensal ultrapassa os 20°C, e para os meses de inverno a temperatura se situa abaixo dos 18°C. Mudanças extremas podem intensificar o risco climático com o aumento de desastres naturais no sul da América do Sul e maior frequência de incêndios na região da Amazônia e Pantanal (GOUVEIA et al., 2022). Para a cidade de São Paulo, as projeções futuras indicam o aumento no número de dias e noites quentes e redução no número de dias e noites frios. As mudanças também indicam que eventos que usualmente não acontecem em São Paulo passem a ocorrer, como ondas de calor (NOBRE et al., 2010).

Em paralelo, os anos de 2020 e 2021 culminaram no isolamento social e confinamento das pessoas em suas residências como medida para controlar a dispersão do vírus da COVID-19. Essa dinâmica resultou em um rápido incremento do consumo energético pelas residências. Segundo o Balanço Energético Nacional, em 2020 as residências apresentaram um incremento de 3,4% no consumo energético em comparação ao ano de 2019 (EPE, 2021). A tendência do aumento da demanda energética nas cidades também é provocada pelo rápido crescimento da população urbana.

Os eventos da mudança climática e o maior confinamento das pessoas em suas casas revelam a preocupação com a forma de construir as cidades nas diferentes escalas do planejamento e do desenho urbano. A densificação urbana é considerada a melhor solução para o desenvolvimento sustentável das áreas urbanas nas esferas econômica, social e ambiental (KO, 2013). No entanto, o adensamento, quando não realizado de maneira condizente com os aspectos ambientais, pode causar grandes mudanças no balanço energético das cidades. A propriedade dos materiais urbanos empregados, redução da vegetação e paisagens naturais, a geometria urbana que impede o fluxo do vento e o próprio calor gerado a partir das atividades humanas são as principais causas dessas mudanças. Como resultado, tem-se o aumento da temperatura do ar nas áreas urbanizadas, quando comparadas às áreas rurais, principalmente em noites de céu claro e pouco vento, configurando a ilha de calor urbana. Além disso, a geometria urbana afeta o particionamento da energia e, conseqüentemente, o balanço de radiação. Mudanças também ocorrem na disponibilidade da iluminação natural no interior das edificações. A intensidade dessas mudanças depende da morfologia urbana e das condições climáticas do local.

O efeito da inter-relação entre edificações pode ser substancial na acurácia dos resultados de demanda de energia para as cidades. Segundo Allegrini et al. (2016), a radiação de onda curta e a radiação de onda longa são as variáveis mais importantes nas trocas térmicas do ambiente urbano. Estudos encontraram redução no consumo de energia para resfriamento das edificações em cidades de clima quente, provocada principalmente pelo sombreamento mútuo entre edifícios em função da geometria do entorno urbano (HAN, TAYLOR e PISELLO, 2017; LIMA, SCALCO e LAMBERTS, 2019). Para Pisello et al. (2012), ao desconsiderar o entorno urbano, cidades de clima quente tendem a apresentar resultados superestimados (até 42% de diferença para o verão) da demanda energética. Em cidades de clima frio a diferença também é significativa (até 22% no inverno).

Estudos recentes têm trabalhado no desenvolvimento de fluxos de trabalho paramétrico para o planejamento urbano considerando a automatização de alterações no desenho das edificações (tipologia, área de janelas e propriedade dos vidros) de acordo com o contexto climático e parâmetros urbanísticos (distância entre edificações, área útil e orientação solar) (VARTHOLOMAIOS, 2017; NATANIAN, ALEKSANDROWICZ e AUER, 2019; XIA & LI 2021).

Um estudo de caso conduzido em uma área de 100 hectares na cidade de São Paulo identificou diferenças em função da morfologia urbana e condição microclimática. A zona mais quente no ambiente aberto corresponde ao tecido urbano com edificações de baixo gabarito, composto de materiais asfálticos e metálicos, afastada da zona com edificações verticais e com uma visão de céu livre de obstáculos. A zona mais fria, por sua vez, ocorreu dentro de espaços sombreados, dominados por arranha-céus ou abaixo da copa das árvores e circundados por tecidos urbanos com materiais de baixa condutividade térmica. A proximidade entre as zonas revelou uma correlação efetiva entre o arranjo espacial urbano e as condições microclimáticas (PACIFICI et al., 2017).

Nesse contexto, o presente artigo buscou investigar o desempenho térmico e lumínico de pequenas unidades habitacionais em um edifício residencial existente situado no bairro Vila Olímpia de São Paulo, próximo da Av. Faria Lima em uma área de influência dos Eixos de Estruturação da Transformação Urbana, proposta pelo Plano Diretor Estratégico da cidade de São Paulo. Segundo o PDE, nas Macrozonas de Estruturação e Qualificação Urbana estimulam a promoção de edifícios de uso misto e não há limite do gabarito de altura, desde que o coeficiente de aproveitamento máximo seja atingido. As simulações apresentadas buscam considerar as diferentes composições morfológicas do entorno urbano para os cenários climáticos atual e futuro.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia de análise adotada neste trabalho consistiu no levantamento de dados da edificação e do entorno, na modelagem, na realização das simulações computacionais, no tratamento de dados e análise dos resultados.

Na primeira etapa foi realizado o *i*) levantamento de dados do objeto de estudo escolhido e seu entorno imediato, sendo um edifício residencial multifamiliar com 6826 m², 16 andares e 88 unidades entre 25 e 100 m², concluído no ano de 2018 e situado na Zona Mista de Alta Densidade - 3a/004.

Para a *ii*) modelagem do edifício, tomou-se como base imagens e desenhos técnicos disponíveis na *internet* com acesso aberto (ARCHDAILY, 2019). A estrutura é composta de pilares, vigas e laje nervurada em concreto de espessura 0.14 m. Além disso, tem-se o contrapiso de espessura 0.05m e forro em placa de gesso de espessura 0.02 m, resultando em uma transmitância térmica de 3.0 W/m²K na cobertura. Como vedação externa tem-se parede de alvenaria de tijolo cerâmico de 6 furos (0.09 x 0.19 x 0.29 m), com reboco externo e interno em argamassa de espessuras 0.05m e 0.01m, respectivamente. A vedação externa resulta em uma transmitância térmica de 2.32 W/m²K. Foram consideradas 5 trocas de ar por hora e janelas desobstruídas com transmitância térmica de 5.6 W/m²K e 0.87 de fator solar. As propriedades térmicas dos materiais estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades térmicas dos materiais dos componentes construtivos.

Material	Condutividade térmica (W/m.K)	Densidade de massa (kg/m ³)	Calor Específico (J/kg.K)
Concreto	1,75	2200	1000
Tijolo cerâmico	1,05	1800	1000
Argamassa	1,15	1800	1000
Placa de gesso	0,70	1000	840

Para o modelo de simulações foi selecionado o sexto pavimento a fim de avaliar as condições de iluminação e desempenho térmico em todas as orientações onde foram dispostos os ambientes de permanência prolongada. A Figura 1 apresenta a planta baixa e corte do pavimento que foi selecionado por ser representativo de unidades entre pisos, portanto, caracterizando as unidades sem cobertura expostas ao sol.

Figura 1 - Planta do pavimento tipo *studios* 1 a 6 (a) e corte longitudinal (b)



Fonte: Archdaily (2019)

Na modelagem do entorno utilizou-se os parâmetros do banco de dados do Geosampa (SÃO PAULO, 2019) para elaboração dos modelos de simulação. A Tabela 2 apresenta os parâmetros construtivos no Plano Diretor Estratégico da cidade de São Paulo, dispostos na zona em que o edifício está situado, no bairro Vila Olímpia. A

Figura 2 ilustra os dois cenários de entorno urbano: o cenário presente, que corresponde a situação existente de ocupação do solo, e o cenário hipotético verticalizado, que corresponde a situação proposta pelo Plano Diretor Estratégico. Ao todo serão avaliados quatro cenários, sendo eles: dois cenários de ocupação existente e dois cenários hipotéticos, ambos para condições climáticas atual e futura.

Tabela 2 - Parâmetros de ocupação

Taxa de ocupação	Taxa de permeabilidade	Coefficiente de Aproveitamento	Gabarito
0.5 / 0.2	0.15	4.00	66m

Fonte: São Paulo (2014).

Figura 2 - Cenários simulados

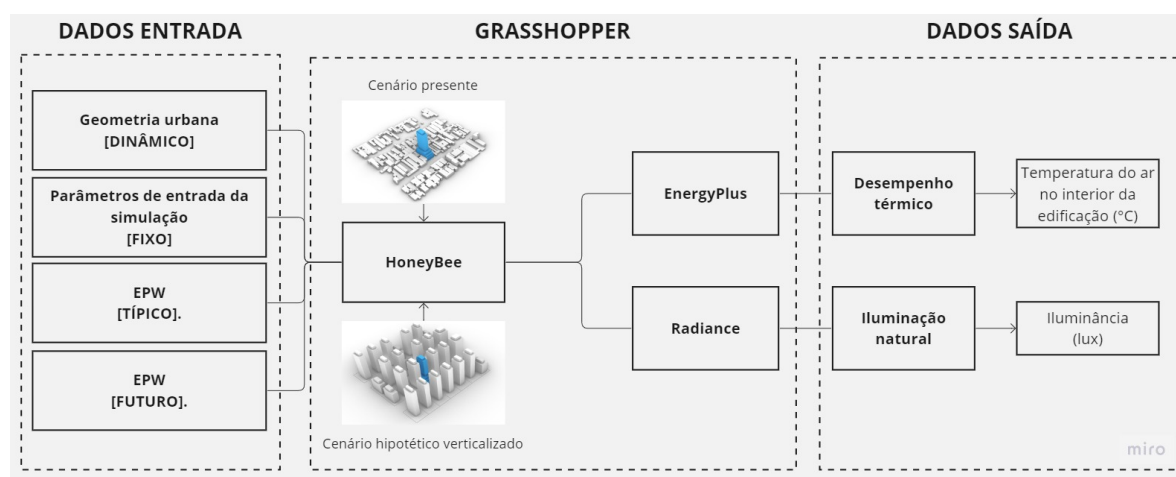


<p>Cenário presente Zona Mista de Alta Densidade - 3a/004 Coef. de Aproveitamento Máximo = 4,00</p>	<p>Cenário hipotético verticalizado Zona Mista de Alta Densidade - 3a/004 Coef. de Aproveitamento Máximo = 4,00</p>
--	--

Taxa de Ocupação do entorno = existente Gabarito do entorno = existente	Taxa de Ocupação do entorno = 0,2 Gabarito do entorno = 20 andares
--	---

No que diz respeito *iii*) as simulações computacionais, a simulação de iluminação natural e radiação de onda curta dos cenários foram realizadas no *Grasshopper*, uma interface de programação visual, parte do pacote *Rhinoceros 3D*. Para realizar a simulação de iluminação natural o *Grasshopper* usa o motor de cálculo do modelo *Radiance* e, para a simulação de radiação de onda curta, ele usa o motor de cálculo do *EnergyPlus*¹ utilizando a versão 9.0.1 (USDOE, 2018). A Figura 3 sintetiza o fluxograma de trabalho para a simulação computacional.

Figura 3 - Fluxograma de simulação de desempenho térmico e lumínico.



Para os cenários com condições climáticas atuais, foi utilizado o arquivo climático “BRA_SP_Sao.Paulo-Congonhas.AP.837800_TMYx.2004-2018”² o qual representa o ano típico dos dados tratados entre os anos de 2004 a 2018. No caso dos dados para as simulações climáticas futuras, foram consideradas as projeções climáticas para o ano de 2076 realizadas pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG-USP) utilizando dois modelos meteorológicos: o regional RegCM4 e global *Max-Planck Institute for Meteorology* (MPI) (ALVES, DUARTE GONÇALVES, 2016). O cenário aplicado é o RCP 8,5 (*Representative Concentration Pathways*) do IPCC AR5, o qual representa o maior nível de emissões estimadas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC).

Posteriormente, na etapa *iv*) tratamento de dados e análise dos resultados, foram utilizados tratamentos estatísticos básicos, bem como gráficos com as simulações horárias em bases anuais produzidas para os diferentes cenários propostos. O trabalho avalia as condições de conforto ambiental sob a perspectiva do desempenho lumínico e térmico. Conforme apresenta a Tabela 3, os critérios de avaliação do desempenho lumínico consideram os requisitos das normativas LM 83-12 (IESNA, 2012 - *Iluminating Engineering Society of North America*) e NBR 15.575 (ABNT, 2013); e o desempenho térmico considera exclusivamente a normativa NBR 15.575 (ABNT, 2013).

¹ As validações do EnergyPlus (ANSI/ASHRAE Standard 140- 2011) podem ser verificadas em:

<<https://energyplus.net/testing>> Acesso em: 01 abril 2023.

² Dados climático disponível em:

<http://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/BRA_Brazil/SP_Sao_Paulo/BRA_SP_Sao.Paulo-Congonhas.AP.837800_TMYx.2004-2018.zip> Acesso em: 21 abril 2023

Em razão de sua ampla aplicabilidade por meio de padrões e certificações, os índices do LM 83-12 (IESNA, 2012) foram considerados para a avaliação do nível de iluminância dos apartamentos. A IESNA propõe duas métricas para a avaliação de edifícios iluminados naturalmente: ASE (*Annual Sunlight Exposure*) e sDA (*Spatial Daylight Autonomy*). Esta última métrica foi adotada no presente trabalho e requer uma iluminância mínima de 300 lux na superfície horizontal de ambientes internos em pelo menos 50% do período de análise. Outro critério adotado é a iluminância mínima para ambientes de habitação proposto pela NBR 15.575 (ABNT, 2013). O desempenho térmico também foi avaliado pela normativa NBR 15.575 (ABNT, 2013) que visa garantir ao usuário condições térmicas adequadas para o desenvolvimento das suas atividades na habitação. Apesar de ter sido publicada uma atualização desta normativa em 2021, foi adotada a versão de 2013 com o objetivo de comparar a temperatura simulada de forma simplificada e considerar a temperatura do ar externo na análise de desempenho térmico. O critério de avaliação considera as condições de verão que tem como parâmetro o valor máximo diário da temperatura do ar interior de recintos de permanência prolongada, como salas e dormitórios.

Tabela 3 - Critérios de avaliação do desempenho térmico e lumínico

Desempenho lumínico		Desempenho térmico
LM-83-12	NBR 15.575	NBR 15.575
$E \geq 300$ lux por pelo menos 50% do período de análise	$E \geq 60$ lux (M)	$T_{i,m\acute{a}x.} \leq T_{e,m\acute{a}x.}$ (M)
	$E \geq 90$ lux (I)	$T_{i,m\acute{a}x.} \leq (T_{e,m\acute{a}x.} - 2^{\circ}\text{C})$ (I)
	$E \geq 120$ lux (S)	$T_{i,m\acute{a}x.} \leq (T_{e,m\acute{a}x.} - 4^{\circ}\text{C})$ (S)

Fonte: Adaptado de IESNA (2012) e NBR 15.575 (ABNT, 2013).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados do desempenho lumínico e térmico consideram os indicadores da iluminância e temperatura do ar no interior dos *Studios*. Reitera-se que no cenário presente não foi considerada a obstrução do entorno por ele ser majoritariamente baixo e não apresentar obstrução ao pavimento estudado. Por outro lado, o cenário futuro prevê obstruções com a possibilidade da verticalização, com base na legislação urbanística vigente.

3.1 Avaliação das condições de iluminação natural

As condições de iluminação natural foram avaliadas nos solstícios de inverno e verão às 9:30h e 15:30h para correlacionar diferentes períodos do ano e o impacto nas condições de iluminação natural frente ao processo de verticalização do entorno. Considerou-se apenas a radiação solar global.

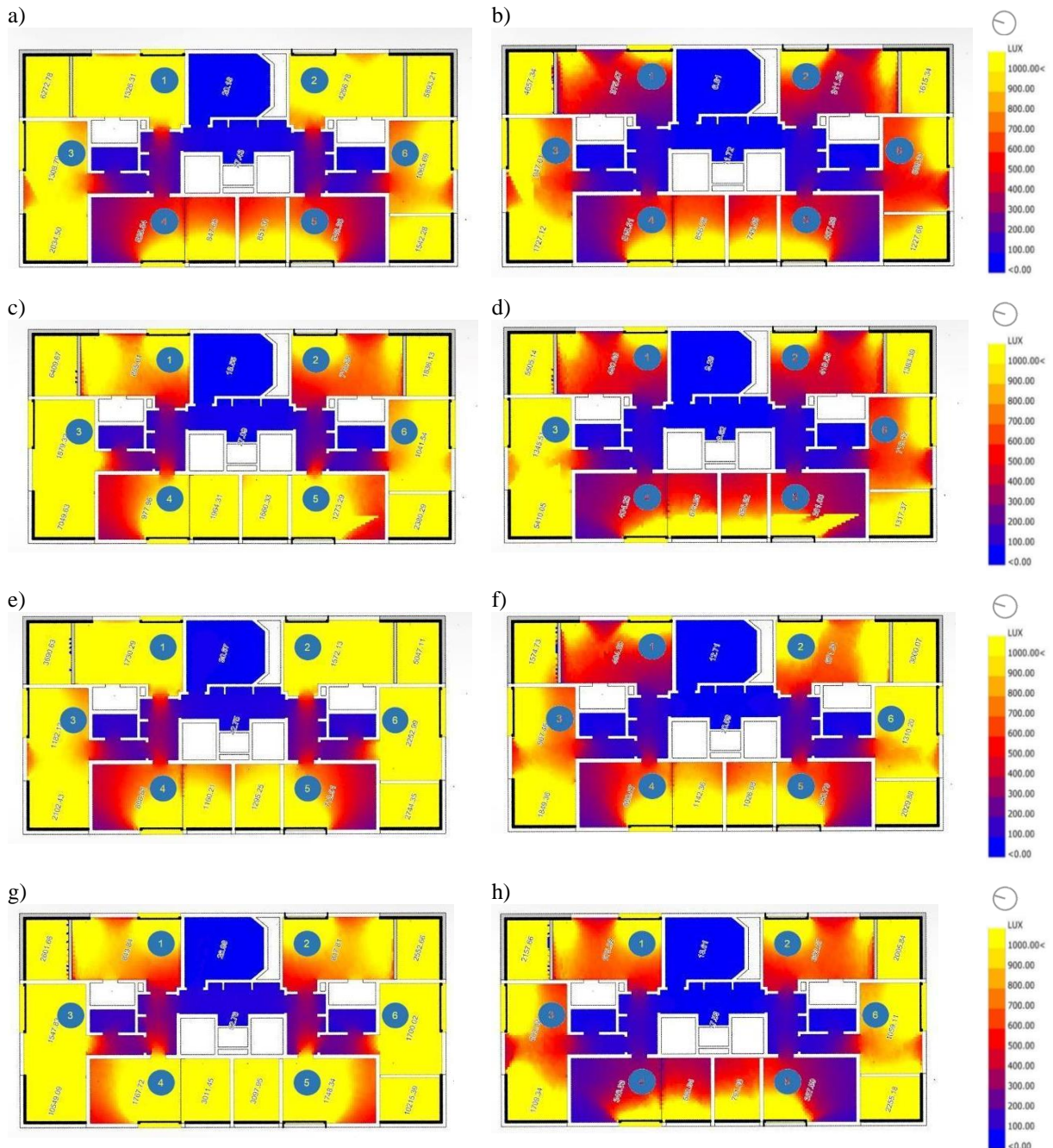
A Figura 4 representa graficamente a distribuição da iluminação natural no pavimento. Observa-se uma tipologia típica dos edifícios residenciais multifamiliares com a área de circulação central e desprovida de iluminação natural. Diferenças significativas são observadas na distribuição interna da iluminação natural nas unidades habitacionais com a diminuição gradativa da iluminância nos espaços mais afastados das fachadas com aberturas.

No solstício de verão às 9:30h as iluminâncias mínimas e máxima apresentam maiores diferenças entre si quando comparadas ao horário das 15:30h. Verifica-se uma iluminância estimada com cenário presente na faixa de 713 lux a 2.253 lux no *Studio 5* (sudoeste) e *Studio 6* (sul), respectivamente. No solstício de inverno às 9:30h a variação também é maior às 09:30h, sendo de, no mínimo, 548 lux, e no máximo, 1.267 lux, no *Studio 5* (sudoeste) e *Studio 2* (sudeste), respectivamente.

Com o entorno hipotético verticalizado no solstício de verão às 9:30h, a menor iluminância corresponde a 494 lux no *Studio 1* (norte) e, a maior, de 1.310 lux no *Studio 6* (sul). No mesmo

cenário hipotético verticalizado, no solstício de inverno às 9:30h, a variação encontrada é de, no mínimo, 311 lux no *Studio 6* (sul) e, no máximo, 680 lux no *Studio 5* (sudeste).

Figura 4 - Solstício de inverno às 9:30h cenário presente (a) e hipotético verticalizado (b); solstício de inverno às 15:30h cenário presente (c) e hipotético verticalizado (d); solstício de verão às 9:30h cenário presente (e) e hipotético verticalizado (f); solstício de verão às 15:30h cenário presente (g) e hipotético verticalizado (h)



Os gráficos comparativos da Figura 5 e

Figura 6 apresentam a iluminância para cada *studio* de acordo com o cenário nos solstícios de verão e inverno. Os dados permitem observar as diferenças percentuais entre ambos os cenários, presente e hipotético verticalizado. Apesar dessa redução expressiva, os resultados demonstram que a

iluminância dos ambientes internos do sexto pavimento apresenta nível de desempenho superior (S), de acordo com os parâmetros estabelecidos pela norma NBR 15.575 (ABNT, 2013).

Com isto, verifica-se que, como esperado, o entorno hipotético verticalizado resulta em reduções significativas na disponibilidade de iluminação natural tanto no verão (redução média de 48%) quanto no inverno (redução média de 50%) nos *studios* em comparação a situação com o cenário presente. Com a densificação e verticalização do entorno, as iluminâncias em alguns *studios* (1, 2, 4 e 5) apresentam iluminância próximas ao limite inferior mínimo de 300 lux da normativa LM-83-12 (IESNA, 2012).

Figura 5 - Iluminâncias nos *studios* nos diferentes cenários para o solstício de verão

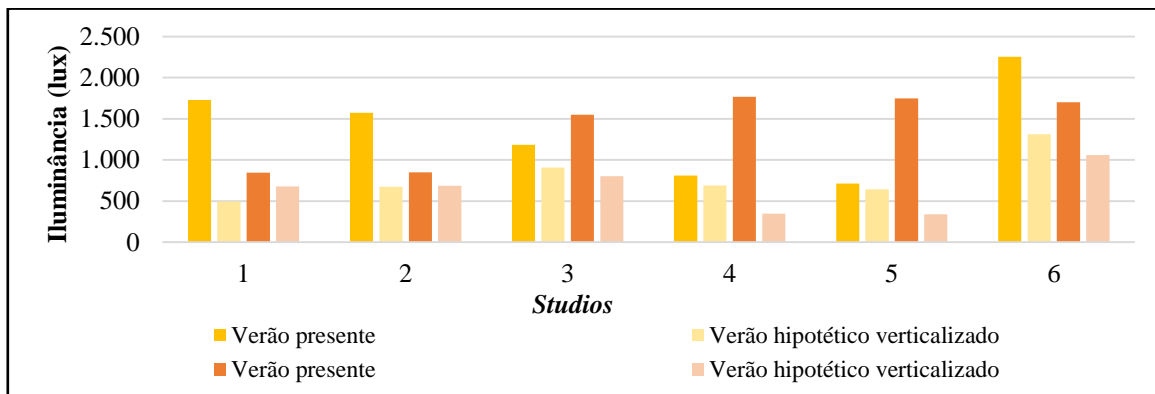
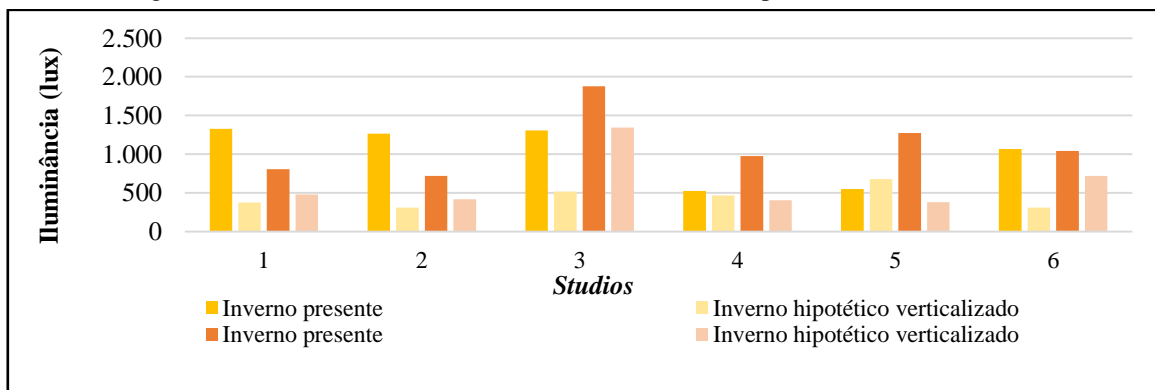


Figura 6 - Iluminâncias nos *studios* nos diferentes cenários para o solstício de inverno



3.2 Avaliação das condições de desempenho térmico

A avaliação do desempenho térmico demonstra diferenças significativas entre os *studios* de acordo com a orientação solar. O apartamento com as maiores temperaturas é o *studio 3*, orientado a noroeste. Em segundo lugar, tem-se o *studio 1*, orientado a norte. O *studio 2* é o terceiro com as temperaturas mais elevadas, orientado para sudeste. O quarto é o *studio 4*, a oeste, seguido pelo *studio 5*, a sudoeste, e, por último, o *studio 6*, orientado para Sul.

Os resultados encontrados demonstram que, conforme o solstício de inverno se aproxima (Figura 7), mais as temperaturas dos *studios 1 e 3*, a noroeste e norte, se elevam – um bom aspecto a ser considerado para dispor ambientes nessa orientação, visto a necessidade de aquecimento passivo durante o inverno. Já no verão, os *studios 1, 3 e 4* tendem a diminuir sua temperatura interna.

Conforme o solstício de verão se aproxima, em dezembro (Figura 8), as temperaturas internas dos *studios* 2, 5 e 6 se elevam.

Essa constatação demonstra o quão termicamente crítico pode ser um ambiente de permanência prolongada na orientação sudoeste e sul na cidade de São Paulo, pois, no verão, há um aumento da temperatura do ar nessas orientações em função do ganho solar e, no inverno, a diminuição pela ausência de ganhos solares.

Figura 7 - Temperatura do ar interno para o cenário presente nos diferentes *studios* de janeiro a junho

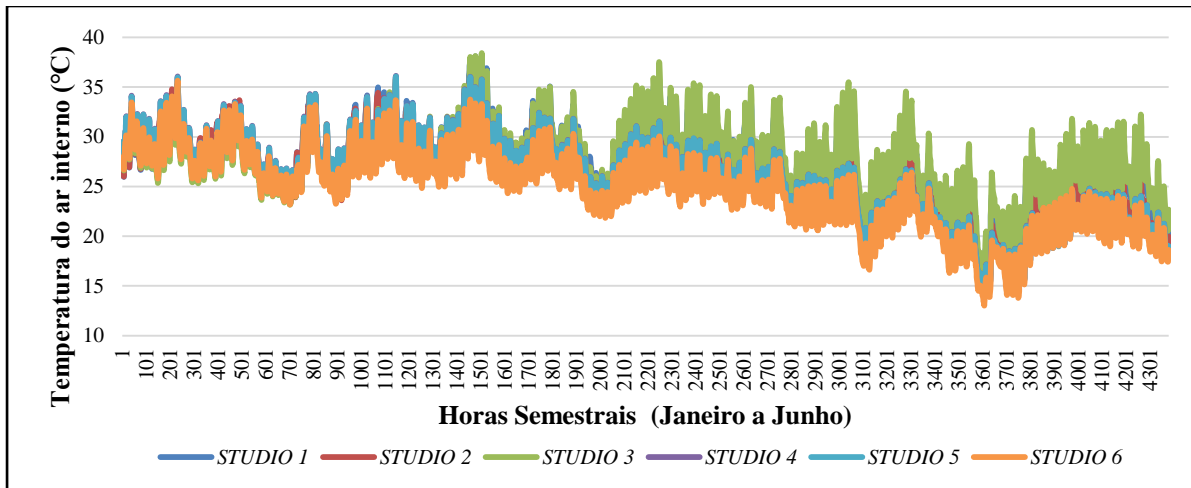
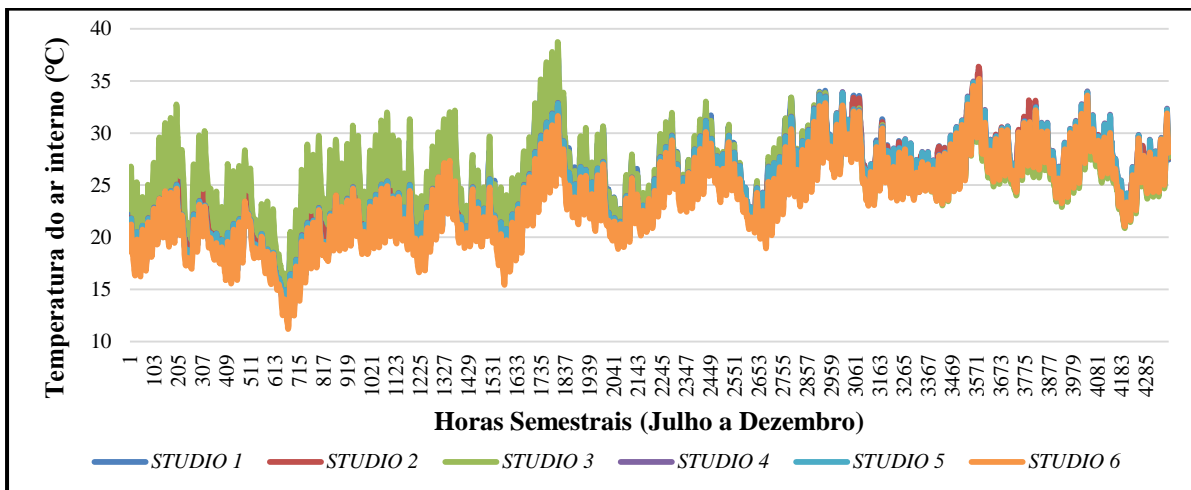


Figura 8 - Temperatura do ar interno para o cenário presente nos diferentes *studios* de julho a dezembro



Considerando as unidades de maior (*studio* 3) e menor temperatura (*studio* 6) no cenário futuro, as figuras 9 e 10 ilustram o perfil de temperaturas para todo o ano, para ambas as situações, com e sem entorno. Como esperado, o cenário que considera o entorno apresenta temperaturas médias menores que o cenário sem entorno, representando uma diferença da média anual de 2,2 °C. De maneira mais sensível, as temperaturas do cenário com entorno e sem entorno apresentam, respectivamente 41°C e 39 °C, no verão, e 21°C e 19°C, no inverno. Este resultado demonstra a importância do entorno urbano sobre o desempenho térmico dos edifícios. Apesar de os *studios* estarem localizados em um pavimento

entre pisos e a cobertura não estar exposta ao sol, é significativo o ganho térmico solar a partir dos fechamentos opacos e envidraçados.

Por outro lado, considerando o apartamento com temperaturas mais baixas (*studio 6*) não apresenta grandes variações de temperatura no inverno, sendo com entorno e sem entorno de 17°C e 18°C, respectivamente. Conforme demonstra a Figura 9, esta variação de aproximadamente 1°C se dá, principalmente, em função da obstrução da diminuta radiação difusa incidente na fachada sul. De maneira mais expressiva, os períodos de verão apresentaram maior variação entre as temperaturas máximas, sendo de 35°C com entorno e 38°C sem entorno.

Observou-se também que há um incremento significativo na temperatura do ar frente as mudanças climáticas previstas nos cenários com clima futuro. Conforme ilustra a figura 10, as temperaturas mínimas apresentam uma variação mais significativa se comparadas com as temperaturas máximas, ou seja, o aumento das temperaturas máximas é importante, mas o aumento das mínimas se mostra como um agravante na discussão das mudanças climáticas nas centralidades urbanas. Com relação à temperatura mínima e máxima nos *studios* analisados, destaca-se o aumento das temperaturas mínimas do ar interno, de até 7°C. Em contrapartida, a variação de temperaturas máximas foi de 3°C. Essa variação na temperatura mínima e máxima mantém o não atendimento da edificação ao nível de desempenho térmico mínimo.

Figura 9 - Temperatura anual no *studio 3* para os cenários presente e hipotético verticalizado com clima futuro

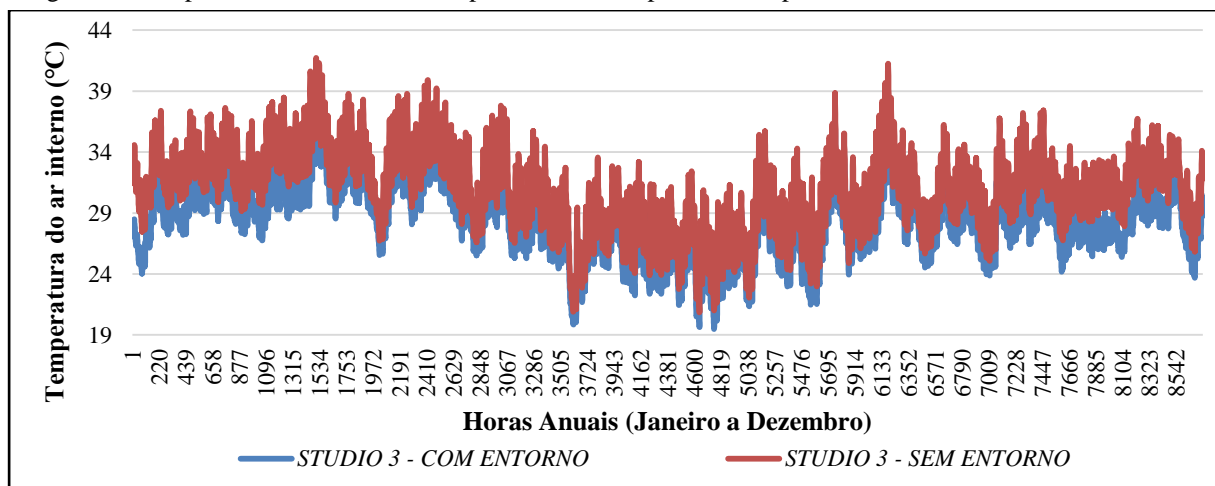


Figura 10 - Temperatura anual no *studio 6* para os cenários presente e hipotético verticalizado com clima futuro

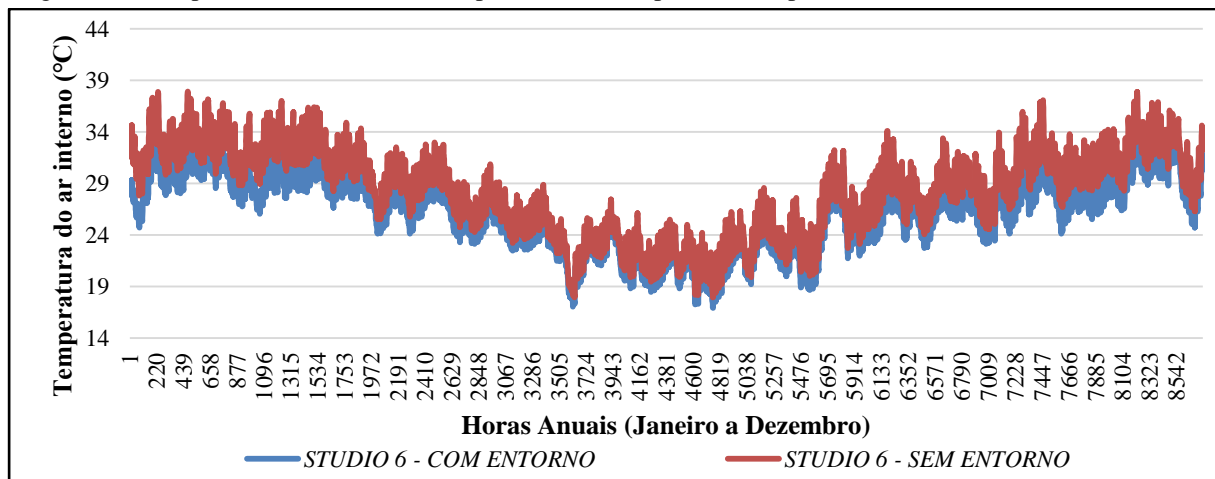
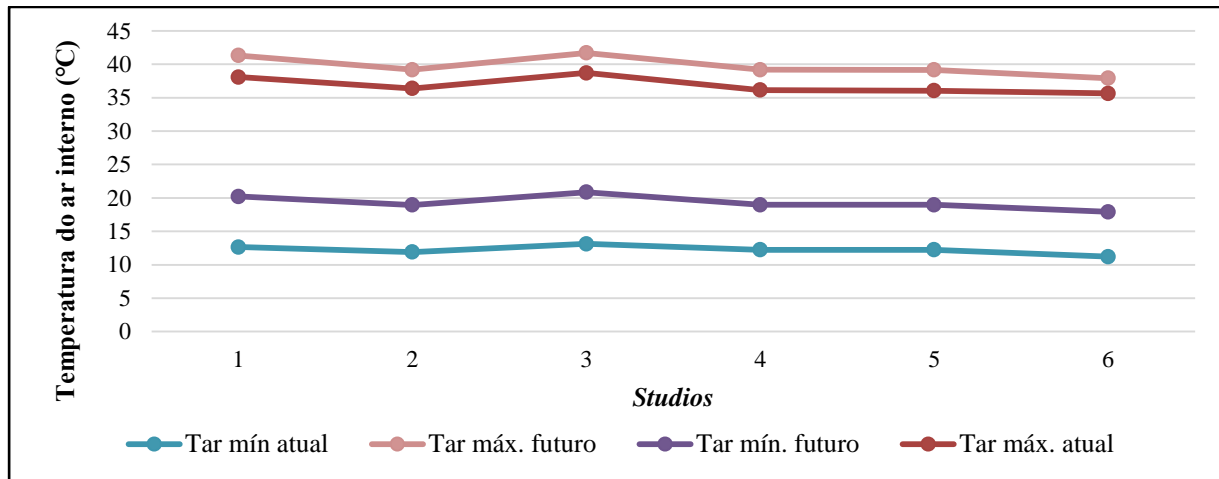


Figura 11. Temperaturas mínimas e máximas do ar nos *studios* para o cenário hipotético verticalizado com climas atual e futuro.



3.3 Síntese das condições de desempenho lumínico e térmico

As condições de desempenho lumínico e térmico para os diferentes cenários são sintetizadas e apresentadas pela Tabela 4. Com relação ao desempenho lumínico, observa-se uma redução significativa na iluminância média do cenário presente para o cenário hipotético verticalizado, sendo o percentual de redução de 66% para o clima atual e 63% para o clima futuro. Apesar disto, mantém-se o atendimento a ambas as normativas, sendo o nível de desempenho superior (S) para a NBR 15.575 (ABNT, 2013). É notável o baixo grau de exigência desta norma no que se refere ao desempenho lumínico, onde para um nível superior de desempenho se exige uma iluminância maior ou igual a 120 lux. Em contrapartida, o atendimento a LM-83-12 (IESNA, 2012) exige 300 lux, portanto, mais exigente.

A avaliação do desempenho térmico resultou em variações significativas das temperaturas máximas no ar no interior da edificação. Em condições climáticas atuais, a mudança da ocupação do solo com o cenário hipotético verticalizado reduziu em 1,9°C a temperatura máxima do ar interior em função do sombreamento do entorno. O maior impacto ocorre em condições climáticas futuras, atingindo uma redução da temperatura máxima do interior de 2,6°C. O clima futuro prevê temperaturas do ar externo de até 37,9°C, ou seja, um incremento de 5,1°C em relação a condição climática atual. Mesmo com a obstrução do sol potencializada pelo cenário hipotético verticalizado, a edificação não atende aos parâmetros mínimos exigidos pela NBR 15.575 (ABNT, 2013).

Tabela 4. Sumário dos resultados de desempenho térmico e lumínico no verão.

Cenários	E(lux)	T _{imáx} (°C)	T _{emáx} (°C)	LM-83-12	NBR 15.575	NBR 15.575
				≤E	≤E	T _{imáx} ≤ T _{emáx}
Cenário presente e clima	1061	38,7	32,8	Atende	S	Não atende

atual						
Cenário hipotético verticalizado e clima atual	534	36,8	32,8	Atende	S	Não atende
Cenário presente e clima futuro	1.392	41,7	37,9	Atende	S	Não atende
Cenário hipotético verticalizado e clima futuro	718	39,1	37,9	Atende	S	Não atende

*Classificação desempenho NBR 15.575: mínimo (M); intermediário (I) e superior (S).

4. CONCLUSÕES

O fenômeno das ondas de calor se tornará cada vez mais frequente em áreas urbanas de alta densidade devido aos efeitos das mudanças climáticas. Este trabalho verificou o impacto das mudanças climáticas e do adensamento urbano sobre o desempenho térmico e luminoso de apartamentos *studio* em um edifício residencial multifamiliar na cidade de São Paulo/SP. Foram consideradas as variáveis de iluminância e temperatura do ar interno, respectivamente.

A análise do desempenho lumínico demonstra que o adensamento e verticalização do cenário hipotético verticalizado resultam em uma redução da iluminância média dos *studios* de 48% e 50% nos solstícios de verão e inverno, respectivamente. Neste caso, apesar de alguns *studios* apresentarem valores próximos ao limite inferior de iluminância mínima de 300 lux, a maior parte dos *studios* atendem a recomendação da norma LM-83-12 (IESNA, 2012). Por outro lado, a norma NBR15.575 (ABNT, 2013) é menos rigorosa do que a LM-83-12, resultando em uma classificação de nível de desempenho superior (S) quanto ao nível de iluminação natural em todos os cenários analisados, com iluminâncias acima de 120 lux.

Com relação à análise do desempenho térmico baseada na NBR15.575 (ABNT, 2013), o cenário que considera o adensamento do entorno apresentou uma redução da temperatura média anual em comparação ao cenário sem entorno. O sombreamento do entorno imediato sobre a edificação diminuiu o tempo de exposição da envoltória à radiação solar direta, resultando em uma redução da temperatura máxima no interior da edificação de 2,6 °C. Apesar disto, a redução da temperatura máxima não foi suficiente para o atendimento do nível de desempenho térmico mínimo.

Ainda sobre a análise dos cenários climáticos atual e futuro, destaca-se sobretudo o aumento das temperaturas internas máximas e mínimas anuais face à estimativa do aumento de temperatura do RCP8.5 para a cidade de São Paulo/SP. As temperaturas mínimas e máximas do ar interno dos *studios* aumentam em até 7°C e 3°C, respectivamente.

As edificações são sujeitas a fenômenos termofísicos complexos, com constantes trocas de calor por convecção, radiação e condução com o meio externo e entre os ambientes internos. Essas trocas de calor influenciam no conforto térmico dos ocupantes, portanto, análises que visam o desempenho térmico de edificações podem auxiliar na redução do consumo de energia elétrica voltada à climatização das residências. Portanto, é plausível afirmar a importância das estratégias de condicionamento passivo para a remoção de carga térmica, sobretudo no cenário futuro. Caso contrário, a dependência do condicionamento artificial para estabelecer condições de conforto térmico dos usuários da edificação acarretará no aumento consumo de energia elétrica e, conseqüentemente, em uma maior produção de GEE (gases do efeito estufa) e elevação das temperaturas mínimas nos centros urbanos.

As limitações da pesquisa se dão no âmbito do processo de simulação computacional, no qual não foram consideradas as radiações de onda longa. Apesar das trocas radiativas de ondas longas entre edifícios desempenharem um papel importante na determinação do desempenho energético e ambiental dos edifícios, as ferramentas de simulação, como por exemplo o *EnergyPlus*, simplificam

isto assumindo que a temperatura da superfície dos edifícios circundantes é igual à temperatura do ar e, portanto, causam distorções nos resultados. Ignorar as trocas radiativas de ondas longas com o entorno nas simulações pode fazer com que a temperaturas média do ar externa sejam subestimadas.

O quadro analítico apresentado por este artigo pode servir de subsídio para estudos de caso semelhantes. Mais pesquisas são necessárias para examinar o desempenho das edificações em diferentes climas e morfologias do entorno urbano. Pesquisas futuras podem incluir ambas as escalas de análise do desempenho térmico externo e interno para estudar as correlações entre diferentes cenários urbanos frente as mudanças climáticas. Finalmente, no caso do desempenho térmico interno, indica-se a adoção de método normativo como a NBR 15.575 (ABNT, 2013), assim, de maneira mais assertiva avaliar a temperatura e carga térmica da edificação nas diferentes condições climáticas.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à CAPES (Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e o CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Edital Universal) pelo apoio financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa.

5. REFERÊNCIAS

ALLEGRI, J.; DORER, V.; CARMELIET, J. Impact of radiation exchange between buildings in urban street canyons on space cooling demands of buildings. **Energy and Buildings**, v.127, p.1074–1084, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.073>

ALVES, C. A.; DUARTE, D.H.S; GONÇALVES, F.L.T. Residential buildings' thermal performance and comfort for the elderly under climate changes context in the city of São Paulo, Brazil. **Energy and Buildings**, v. 114, p. 62-71, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.044>

ARCHDAILY. **Edifício VN Ferreira Lobo / Studio Arthur Casas**. Disponível em: <<http://www.archdaily.com.br/br/926915/edifício-vn-ferreira-lobo-studio-arthur-casas>>. Acesso em: 19 fev. 2023

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações Habitacionais: Desempenho: Requisitos Gerais. Rio de Janeiro, 2013. 60p.

DESA, U. N. World population prospects 2019: Highlights. **New York (US): United Nations Department for Economic and Social Affairs**, 2019. 125p.

EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional (BEN) 2021: Ano base 2020**. Disponível em <<https://ben.epe.gov.br>>. Acesso em: 19 junho. 2021

GE, M.; FREDERICH, J.; VIGNA, L. **4 Charts explain greenhouse gas emissions by countries and sectors**. Disponível em: <<https://www.wri.org/insights/4-charts-explain-greenhouse-gas-emissions-countries-and-sectors>>. Acesso em: 26 mar. 2023

GOUVEIA, C. D.; TORRES, R. R.; MARENGO, J. A.; AVILA-DIAZ, A. Uncertainties in projections of climate extremes indices in South America via Bayesian inference. **International Journal of Climatology**, p.1-21, 2022. <https://doi.org/10.1002/joc.7650>

HAN, Y.; TAYLOR, J. E.; PISELLO, A. L. Exploring mutual shading and mutual reflection inter-building effects on building energy performance. **Applied Energy**, v.185, p.1556–1564, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.170>.

IESNA - ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. **LM-83-12: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)**. New York, 2012. 39p.

KO, Y. Urban Form and Residential Energy Use: A Review of Design Principles and Research Findings. **Journal of Planning Literature**, v.28, n.4, p. 327–351, 2013. <https://doi.org/10.1177/0885412213491499>.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES. **Arquivos climáticos INMET 2016**. 2019. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2016>>. Acesso em: 20 out. 2023.

LIMA, I.; SCALCO, V; LAMBERTS, R. Estimating the impact of urban densification on high-rise office building cooling loads in a hot and humid climate. **Energy and Buildings**, v.182, p.30–44, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.019>.

NATANIAN, J.; ALEKSANDROWICZ, O.; AUER, T. A parametric approach to optimizing urban form, energy balance and environmental quality: The case of Mediterranean districts. **Applied Energy**, v.254, p.1-17, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113637>.

NOBRE, C. A. et al. Vulnerabilidades das megacidades brasileiras às mudanças climáticas: Região Metropolitana de São Paulo. **Embaixada Reino Unido, Rede Clima e Programa FAPESP em Mudanças Climáticas**, 2010. 189p.

USDOE - UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **Energy Plus 9.0.1**. Washington, DC, 2018. Disponível em: <<https://www.energy.gov/eere/buildings/downloads/energyplus-0>>. Acesso em: 20 mar. 2023.

PACIFICI, M.; MARINS, K. R. D. C.; CATTO, V. D. M.; RAMA, F., LAMOUR, Q. Morphological and climate balance: Proposal for a method to analyze neighborhood urban forms by way of densification. **Sustainable Cities and Society**, vol. 35, p. 145–156, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.07.023>.

PISELLO, A. L.; TAYLOR, J.E; XU, X.; COTANA. F. Inter-building effect: Simulating the impact of a network of buildings on the accuracy of building energy performance predictions. **Building and Environment**, v.58, p. 37–45, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.017>.

SÃO PAULO. Prefeitura Municipal de São Paulo. Lei nº 16.050, de 31 de julho de 2014. Aprova a Política de Desenvolvimento Urbano e o Plano Diretor Estratégico do Município de São Paulo e revoga a Lei nº 13.430/2002. **Diário Oficial da Cidade de São Paulo**, São Paulo, SP, 01 ago. 2014. Disponível em: <<http://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/leis/lei-16050-de-31-de-julho-de-2014>>. Acesso em: 15 abr. 2023

SÃO PAULO. Prefeitura Municipal de São Paulo. **Mapa Digital da Cidade de São Paulo**. 2019. Disponível em: <<http://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/PaginasPublicas/SBC.aspx>>. Acesso em: 19 abr. 2023.

VARTHOLOMAIOS, A. A parametric sensitivity analysis of the influence of urban form on domestic energy consumption for heating and cooling in a Mediterranean city. **Sustainable Cities and Society**, v.28, p. 135–145, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.09.006>.

XIA, B.; LI, Z. Optimized methods for morphological design of mesoscale cities based on performance analysis: Taking the residential urban blocks as examples. **Sustainable Cities and Society**, v.64, p. 1-24, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102489>



O conteúdo deste trabalho pode ser usado sob os termos da licença Creative Commons Attribution 4.0. Qualquer outra distribuição deste trabalho deve manter a atribuição ao(s) autor(es) e o título do trabalho, citação da revista e DOI.