

**Aprendendo com o ambiente construído: análise de decisões projetuais baseadas em conforto térmico através da simulação computacional**

*Learning from the built environment: analysis of design decisions based on thermal comfort through computational simulation.*

*Aprendiendo del entorno construido: análisis de decisiones de diseño basadas en el confort térmico a través de la simulación computacional.*

**Carolina Ventura Ribeiro Araujo**

Mestranda, IFF, Brasil  
carolina.ventura@gsuite.iff.edu.br

**Luciano Falcão da Silva**

Professor Doutor, IFF, Brasil.  
lfalcao@iff.edu.br

## RESUMO

O setor residencial tem grande influência no consumo de energia do país, sendo esse consumo diretamente ligado ao desempenho térmico das edificações, e consequentemente, seu conforto. O aumento do consumo traz a importância de pensar em estratégias projetuais que busquem minimizar os impactos ambientais, ainda em fase de estudo preliminar do projeto, e produzir espaços com um bom desempenho energético e confortáveis termicamente. O presente trabalho, através da simulação computacional, analisou materiais e métodos construtivos que colaboram diretamente com a produção desses espaços, destacando que as ferramentas computacionais se mostram como grandes facilitadores na hora de tomar decisões assertivas de projeto. Com simulações simples, foi possível observar grandes variações de temperatura operativa dentro do cômodo de estudo de caso escolhido, reforçando que decisões projetuais afetam diretamente o conforto térmico das construções. Através de pequenas alterações, já foi possível observar grande influência nas técnicas utilizadas para construir, mostrando que pensar em espaços que tenham um bom desempenho térmico, para além de produzir espaços confortáveis para seus usuários, produz espaços que colaboram com a diminuição do consumo de energia.

**PALAVRAS-CHAVE:** Conforto térmico. Simulação computacional. Consumo de energia.

## SUMMARY

*The residential sector has a significant impact on the country's energy consumption, with this consumption directly linked to the thermal performance of buildings and, consequently, their comfort. The increase in consumption underscores the importance of considering design strategies that aim to minimize environmental impacts, even in the preliminary stages of the project, and create spaces with good energy performance and thermal comfort. This study, through computer simulation, analyzed materials and construction methods that directly contribute to the production of these spaces, highlighting that computational tools serve as significant facilitators in making informed project decisions. Through simple simulations, it was possible to observe significant variations in operative temperature within the chosen case study room, reinforcing that design decisions directly affect the thermal comfort of constructions. Small alterations already demonstrated a considerable influence on the techniques used for construction, showing that contemplating spaces with good thermal performance not only produces comfortable environments for users but also contributes to reducing energy consumption.*

**KEYWORDS:** Thermal comfort. Computational simulation. Energy consumption.

## RESUMEN

*El sector residencial tiene una gran influencia en el consumo de energía del país, ya que este consumo está directamente vinculado al rendimiento térmico de las edificaciones y, consecuentemente, a su confort. El aumento del consumo resalta la importancia de considerar estrategias de diseño que busquen minimizar los impactos ambientales, incluso en la fase de estudio preliminar del proyecto, y producir espacios con un buen rendimiento energético y confort térmico. En este trabajo, a través de la simulación computacional, se analizaron materiales y métodos constructivos que colaboran directamente con la producción de estos espacios, destacando que las herramientas computacionales son grandes facilitadoras a la hora de tomar decisiones acertadas de diseño. Con simulaciones simples, fue posible observar grandes variaciones de temperatura operativa dentro del recinto del estudio de caso elegido, reforzando que las decisiones de diseño afectan directamente al confort térmico de las construcciones. A través de pequeñas modificaciones, ya se pudo observar una gran influencia en las técnicas utilizadas para construir, demostrando que considerar espacios con buen rendimiento térmico no solo produce ambientes cómodos para sus usuarios, sino que también contribuye a la reducción del consumo de energía.*

**PALABRAS CLAVE:** Confort térmico. Simulación computacional. Consumo de energía.

## 1 INTRODUÇÃO

A arquitetura vem se moldando às condições climáticas, desde quando as primeiras moradias começaram a surgir. Inicialmente, em busca de proteção, o homem construía seu abrigo, onde as decisões eram tomadas a partir da necessidade de se proteger da chuva, sol e demais variáveis climáticas. Conforme Kellert e Calabrese (2015), “Por mais de 99% da nossa história de espécies, nos desenvolvemos biologicamente em resposta adaptativa a forças naturais não artificiais ou humanas criadas.” E se tratando da construção, as escolhas dos materiais e métodos construtivos, foram desenvolvidas com base na busca pelo conforto, para que, além da proteção externa, o ambiente interno garantisse um nível desejado de conforto ambiental.

As decisões foram formadas com base nas tentativas, erros e acertos. Na prática, eram testadas as formas de construir, e caso não atingissem o nível de conforto requerido pelo usuário daquele espaço, deveriam ser refeitas. E assim, a arquitetura foi sendo desenvolvida, evoluindo e se moldando com as tecnologias que foram surgindo.

O quão diferente seria se os homens primitivos tivessem a tecnologia existente nos dias de hoje? Se eles pudessem, antes de construir suas moradias, projetar as edificações em ferramentas computacionais, onde implantariam suas casas e nelas pudessem analisar, por exemplo, a temperatura operativa interna, umidade do ar, velocidade do vento, e demais variáveis que interferem diretamente no conforto de um ambiente.

Hoje, a tecnologia avançou e estão disponíveis diversas ferramentas e programas para auxiliar no estudo preliminar de um projeto arquitetônico. Decisões acerca dos materiais e métodos construtivos empregados, e como eles influenciam diretamente no conforto térmico de uma edificação, conseguem ser facilmente simuladas afim de encontrar as melhores soluções para construção.

Pensar em edificações que proporcionam conforto térmico para seus usuários, para além disso, é pensar em construções que possuem um baixo consumo energético proveniente de refrigeração artificial. (SILVA E SOUZA, 2020)

E se tratando de consumo de energia, de acordo com Silva e Souza (2020), esse tema está intimamente relacionado com o impacto ambiental, sendo o setor residencial um grande responsável. Conforme o Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2023), publicação anual sobre a contabilidade relativa à oferta e consumo de energia no Brasil, o setor de habitação consumiu no ano de 2022, 27% da oferta interna de eletricidade no Brasil. Ficando apenas atrás do setor industrial, que consumiu 37%. Ainda sobre os resultados obtidos no balanço, esse consumo aumentou 2,3% em relação ao ano anterior.

Conclui-se que, mesmo sendo a sustentabilidade e arquitetura bioclimática, assuntos amplamente discutidos atualmente, esses valores de consumo estão aumentando, mostrando ainda existir uma falha na preocupação da eficiência energética dos edifícios. Nesse contexto, a busca por soluções projetuais através de simulação computacional, que sejam favoráveis ao desempenho térmico, ainda na fase inicial dos estudos preliminares das edificações, é algo que deve ser estimulado.

Nascimento, Cooper e Rocha (2022) dizem que, no Brasil, o emprego das simulações ainda é muito restrito. Ainda de acordo com os autores:

[...] as ferramentas computacionais são utilizadas como método de avaliação para comprovar atendimento a requisitos de normas de desempenho e sistemas de certificações ambientais, como a ABNT NBR 15.575 e o PBE Edifica (Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações), respectivamente. Com isso, as simulações são empregadas em estágios avançados de desenvolvimento do projeto, impossibilitando, muitas vezes, qualquer tipo de alteração que possa melhorar o desempenho da edificação.

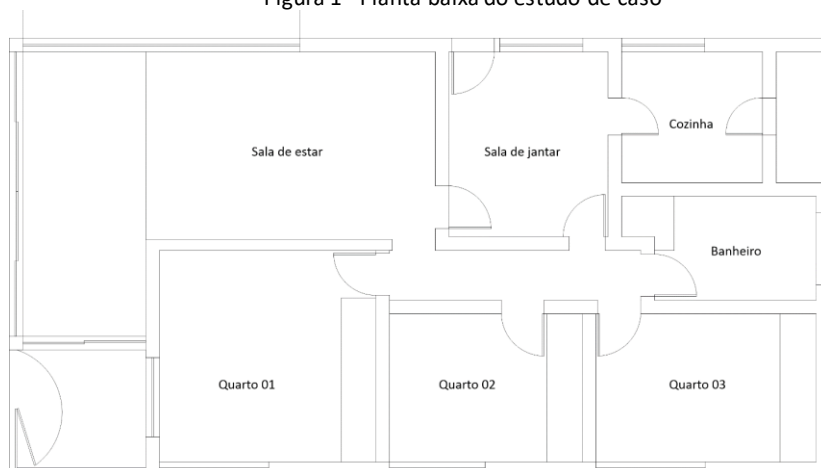
Mendes, Lamberts, Neto (2001), acrescentam que a utilização de simulação no país ainda está concentrada no meio acadêmico, mostrando ser pouco explorada pelos escritórios de arquitetura. Em contrapartida às dificuldades de implementação desse tipo de recursos computacionais nos escritórios de projeto, tais como investimento inicial e capacitação pessoal, a simulação computacional permite a avaliação prévia de diferentes soluções projetuais com baixo custo relativo, se comparados aos custos de execução da obra. Além disso, simulações computacionais podem substituir, em parte, análises experimentais em laboratórios com os mesmos fins, o que em última análise, resulta em economia de recursos, além de contribuir positivamente para a diminuição de consumo energético no país.

O presente trabalho tem como objetivo principal analisar soluções projetuais usuais presentes na literatura, por meio de simulação computacional, de forma a investigar quantitativamente os efeitos de cada uma dessas soluções, no conforto térmico de edificações, e seu potencial para minimizar o consumo de energia. Ainda, discutir a viabilidade técnica da implementação das ferramentas computacionais nos escritórios de arquitetura, e incentivar a utilização dessas ferramentas para fins de análises quanto ao conforto térmico, ainda em fase de projeto.

## 2 METODOLOGIA

A análise de conforto térmico proposto no presente trabalho foi realizada com base em um estudo de caso de um cômodo de uma edificação localizada na cidade de Campos dos Goytacazes. Trata-se da sala de estar de uma residência térrea unifamiliar, que é composta por sala de estar, sala de jantar, cozinha, três quartos e um banheiro, conforme planta baixa apresentada na figura 1.

Figura 1 - Planta baixa do estudo de caso



Fonte: Autora (2023)

Campos dos Goytacazes é uma cidade localizada no interior do estado do Rio de Janeiro, Brasil. A caracterização do clima na região é tropical úmido, com temperaturas elevadas ao longo do ano. Não existe uma variação sazonal bem definida, mas é possível perceber pequenas diferenças entre as estações. O verão costuma ser mais quente e úmido, enquanto o inverno é mais ameno. (LAMBERTS, 1997)

A maior parte das construções da cidade foi erguida com métodos tradicionais de alvenaria, com tijolos cerâmicos ou blocos de concreto. Estruturas de concreto armado são comuns para edifícios mais altos e estruturas mais robustas. As esquadrias das construções contemporâneas são produzidas por materiais como alumínio e vidro, enquanto as construções modernistas, são produzidas em madeira. Dado o clima tropical da região, é de extrema importância que as construções considerem estratégias para lidar com o calor, por isso, as simulações acontecem nos períodos que compreendem entre dezembro e fevereiro, considerados os mais quentes do ano, por se tratar da estação de verão.

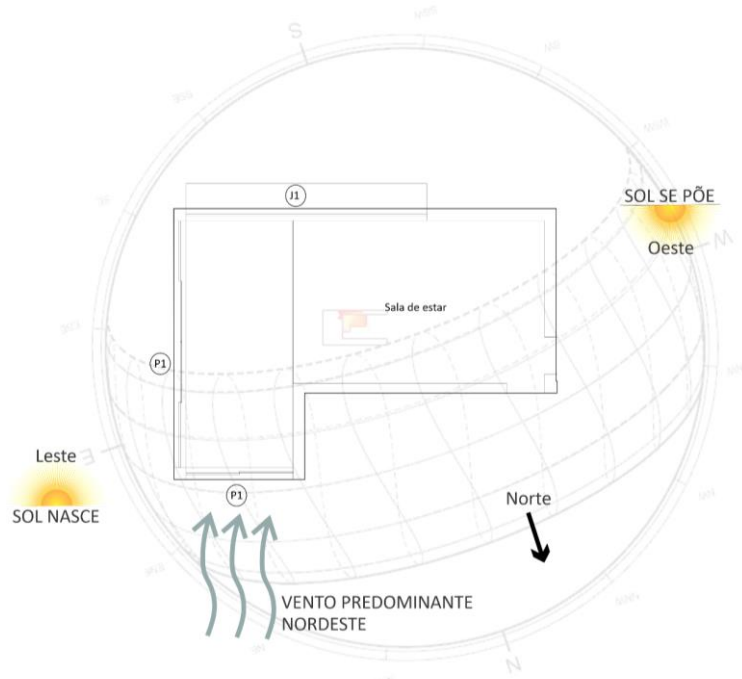
A análise foi realizada considerando simulação computacional por meio da ferramenta LadyBug Tools v.1.7.0, um pacote de ferramentas que está inserido dentro do Grasshopper, que por sua vez é um componente que está inserido dentro do programa de modelagem Rhinoceros. Composto o LadyBug Tools, no total, são quatro ferramentas: Ladybug, Honeybee, Butterfly e Dragonfly. O Ladybug permite a análise de arquivos climáticos como, por exemplo, a carta solar, e o Honeybee utiliza o EnergyPlus/OpenStudio, para análises térmicas e energéticas, este último utilizado para as simulações desse trabalho.

De acordo com a literatura, são diversas as variáveis que interferem diretamente no conforto térmico de uma construção e no seu desempenho energético. A própria forma arquitetônica, por exemplo, influencia na entrada e saída de vento, e na quantidade de iluminação natural e calor proveniente da mesma. As trocas térmicas acontecem, em sua grande maioria, pelas aberturas existentes na edificação, influenciada por fatores como a posição, e se possuem ou não proteção externa e seus materiais. (LAMBERTS, 1997)

E por existirem diversas variáveis e elementos de interferência, as análises se concentraram, principalmente, nas variações de temperatura operativa no interior do cômodo simulado, considerando a variação dos seguintes parâmetros: espessura da parede de alvenaria com tijolos cerâmicos furados, material das esquadrias (vidro, madeira ou misto) e utilização ou não de brises e beirais. Neste estudo de análise paramétrica de um ambiente, o entorno não será levado em consideração, uma vez que os resultados a partir das variáveis escolhidas foram analisadas comparativamente. Foram avaliados os materiais e métodos construtivos levando em consideração o conforto térmico.

O cômodo a ser analisado, como dito anteriormente, é a sala de estar da residência, que possui portas de correr na parte da frente e lateral esquerda (P1) e uma janela com 4 folhas de correr e 2 folhas fixas na lateral direita (J2). A porta lateral possui 2,25 metros de largura e 2,80 metros de altura. Enquanto a porta frontal possui 5,20 metros de largura e 2,80 metros de altura. A janela lateral possui 5,07 metros de largura, 2,10 metros de altura e 0,80 metros de peitoril. O ambiente, assim como a posição do sol quando se nasce e quando se põe, e o vento predominante na cidade de Campos, estão demonstrados na Figura 2.

Figura 2 - Planta baixa sala de estar com carta solar



Fonte: Autora (2023)

As propriedades térmicas dos materiais que foram utilizadas para aplicar na simulação, foram obtidas a partir da Norma Brasileira NBR 15220-2 (ABNT, 2005), de Desempenho térmico de edificações, conforme o quadro 01 abaixo. Valores correspondem a densidade de massa aparente ( $\rho$ ), condutividade térmica ( $\lambda$ ) e o calor específico (C).

Quadro 1 - Propriedades térmicas de materiais

Material	Aplicação	d (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/m.K)	c (kJ/kg.K)	Espessura (m)
Tijolo cerâmico furado	Paredes	1400	0,90	0,92	0,15
Tijolo cerâmico furado	Paredes	1400	0,90	0,92	0,25
Vidro	Esquadrias	2500	1,00	0,84	0,004
Madeira	Esquadrias	750	0,23	1,34	0,03
Concreto normal	Brise/Beiral	2200	1,75	1,00	0,04

Fonte: Adaptado de NBR 15220-2:2005 - Desempenho térmico de edificações

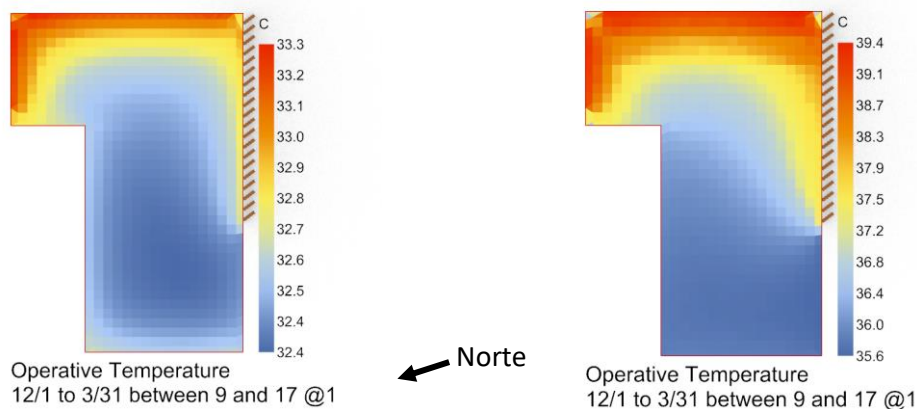
Para avaliação do comportamento térmico do cômodo do estudo de caso, a ferramenta LadyBug utilizou o arquivo *EPW* (EnergyPlus Weather), onde o mesmo possui dados climáticos típicos de cada região, como a temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, entre outros. Esses dados são fundamentais para realização da simulação ajudando na análise do conforto térmico do espaço.

### 3 RESULTADOS

É possível observar, através dos resultados obtidos nas simulações no cômodo do estudo de caso, as variações de temperatura operativa dentro do ambiente, de acordo com o

material escolhido e métodos construtivos. As simulações demonstraram a temperatura operativa no ambiente, nos meses de dezembro a março, no período que compreende entre 9 horas da manhã até as 5 horas da tarde. A figura 3a demonstra a primeira simulação, onde o material das esquadrias adotado foi a madeira, as paredes em alvenaria com tijolo furado de 15 centímetros de espessura, sem beirais e brise. A figura 3b representa o cômodo com as mesmas condições, exceto pelas esquadrias, que foi aplicado o material vidro. Nota-se uma variação na temperatura máxima de aproximadamente 6°C, evidenciando como o material vidro, amplamente utilizado nos projetos arquitetônicos contemporâneos, afeta diretamente o conforto térmico dentro do ambiente.

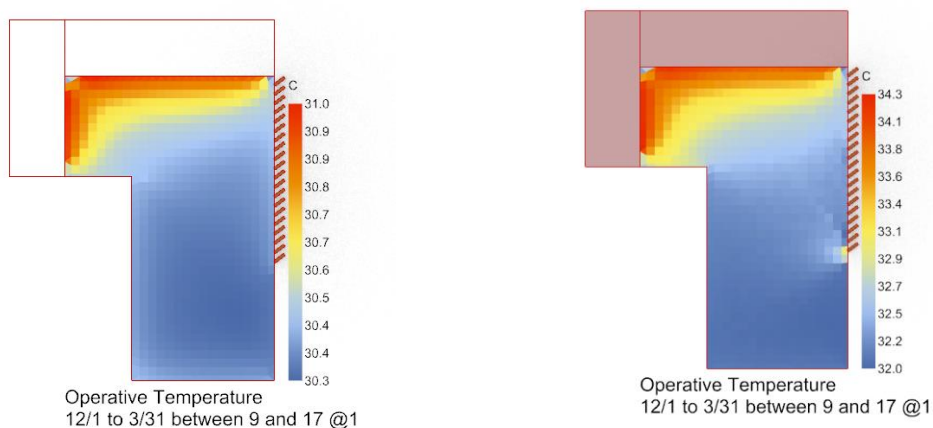
Figura 3 - Variação de temperatura operativa: Esquadrias de madeira (a) e Esquadrias de vidro (b)



Fonte: Autora (2023)

Afim de trazer soluções que amenizem a temperatura dentro do ambiente, foi adicionado à simulação brise de concreto na janela lateral direita (J1), com 0,35 metros de largura, 2,10 metros de altura e 0,05 metros de espessura e beirais também em concreto, com 1,50 metros de extensão com 0,10 metros de espessura, nas portas frontal e lateral (P1). As figuras 4a e 4b, mostram que a aplicação dessas soluções projetuais, resultaram em uma diminuição na temperatura máxima de 2,33°C e 5,1°C, respectivamente.

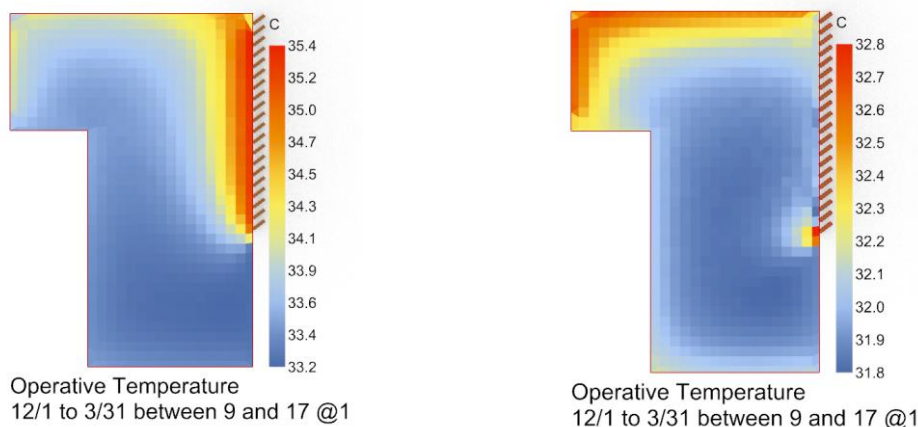
Figura 4 - Variação de temperatura operativa com acréscimo de brise e beiral: Esquadrias de madeira (a) e Esquadrias de vidro (b)



Fonte: Autora (2023)

Uma outra análise, mesclou-se os materiais das esquadrias, colocando as portas (P1) em madeira, e a janela (J1) em vidro, tendo como resultado a temperatura máxima de 35,4°C dentro do ambiente, mostrando uma diminuição de 4°C comparando com o ambiente que possuía todas as esquadrias de vidro (Figura 5a). Ainda com os mesmos materiais das esquadrias, foi adicionado o brise de concreto na janela lateral (J1), mostrando que a temperatura caiu ainda mais em comparação com a simulação anterior (Figura 5B).

Figura 5- Variação de temperatura operativa portas de madeira e janela de vidro: Janela sem brise (a) e Janela com brise (b)



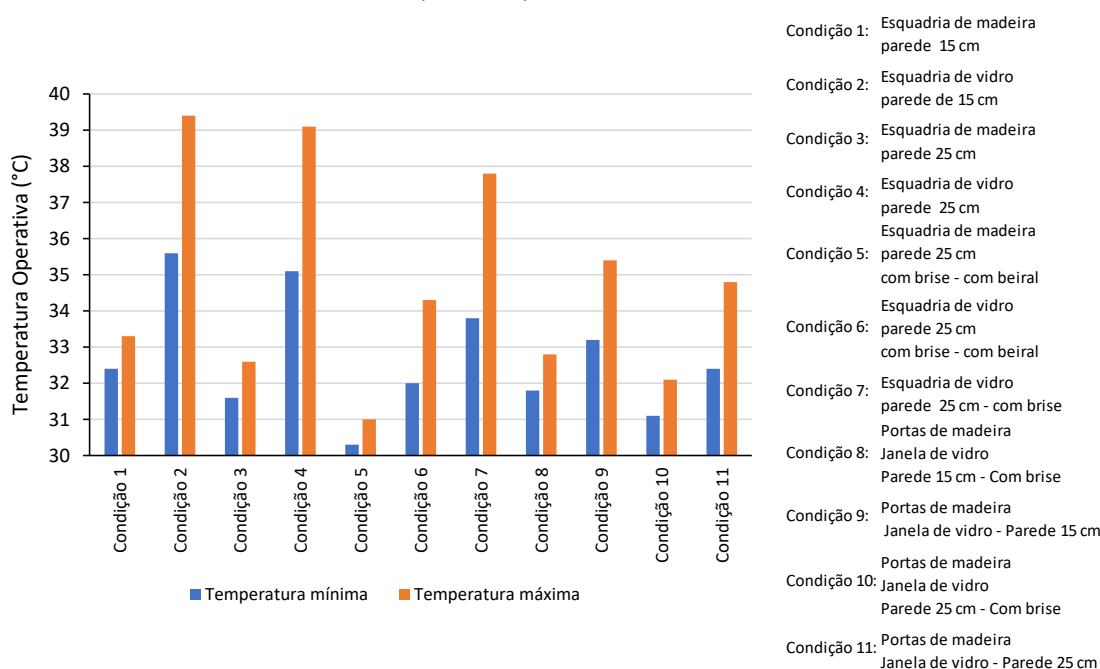
Fonte: Autora (2023)

As simulações evidenciam como as escolhas projetuais podem interferir diretamente no conforto térmico dentro dos espaços. No estudo de caso utilizado como exemplo, onde com esquadrias em vidro a temperatura operativa máxima chegou até 39°C, mostrou como se iria desconfortável permanecer dentro do cômodo sem o auxílio de sistema de refrigeração artificial.

O gráfico 01 abaixo demonstra a temperatura operativa média máxima e mínima dentro do cômodo, em variadas condições relacionadas aos materiais e métodos construtivos da construção.



Gráfico 1 - Temperatura operativa média mínima e máxima



Fonte: Autora (2023)

É possível observar que na condição 5, onde as esquadrias são de madeira, a parede de 0,25 metros de espessura e o brise e beiral presentes, o cenário é o mais favorável em relação ao conforto térmico do ambiente, resultando em uma temperatura operativa máxima de 31°C. Em contrapartida, na condição 2, em que o método construtivo não privilegia a proteção dos ambientes quanto a insolação, a temperatura operativa máxima resultou em 39°C, o que representa uma diferença de 27% a mais. Também é possível destacar, que nas condições 1 e 8, houve pouca variação de temperatura no interior do cômodo, o que também é positivo se tratando do desempenho térmico do espaço.

As simulações utilizaram condicionantes comuns e amplamente aplicadas no campo da construção civil, como o vidro, madeira, tijolo cerâmico e concreto. Com variações simples e a aplicação desses materiais, já foi possível observar uma grande diferença nas temperaturas operativas dentro do ambiente. O recorte não envolveu o tipo de revestimento do piso externo, o entorno da edificação, existência de vegetação, os outros cômodos da própria construção, entre outros, fatores que também influenciam no conforto do espaço, e podem ser melhor desenvolvidos em pesquisas futuras.

#### 4 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar através da simulação computacional, como os materiais e métodos construtivos aplicados atualmente nas construções, afetam o conforto térmico dos espaços. Através dos resultados obtidos das simulações, foi possível observar que elementos construtivos de fácil execução disponíveis no mercado funcionam efetivamente, se tratando de conforto e desempenho térmico das edificações. Algumas soluções já são conhecidas há bastante tempo, porém, pouco exploradas na arquitetura contemporânea. Os resultados alcançados comprovam que é possível pensar em soluções

viáveis, que além de produzir espaços confortáveis termicamente, produzem edificações que colaboram com a diminuição do consumo de energia.

Por meio da simulação computacional em estudo de caso, foi possível observar que as diferenças de temperatura podem chegar a 27% quando da utilização de elementos construtivos tais como brises e esquadrias de madeira, em comparação aos sistemas comumente aplicados hoje em dia, como as janelas em vidro. Observa-se que pequenas alterações no projeto feitas a partir da análise climática, podem trazer melhorias expressivas, mostrando como as decisões de projetos possuem papel decisivo no conforto dos usuários e consumo energético.

Além disso, o trabalho reafirmou como as ferramentas computacionais se mostram como grandes aliadas ainda na fase de estudo preliminar de projetos arquitetônicos, sendo facilitadores que auxiliam os profissionais a encontrarem soluções projetuais. Porém, entende-se que a implantação desta metodologia gera custos, por se tratar de um software pago, o que pode dificultar a inserção da mesma nesse meio. O tempo de aprendizado que o profissional terá que se dedicar para manusear uma nova ferramenta, também deve ser levado em consideração, por se tratar de programas que são poucos explorados nos cursos de arquitetura. Mas apesar dos obstáculos, a execução da simulação em fase de estudo preliminar de projeto, é rápida e assertiva, trazendo soluções práticas em poucos minutos de testes.

Ainda, com os resultados obtidos através das simulações, os escritórios conseguem mostrar na prática para seus clientes, os efeitos dos sistemas construtivos e materiais empregados na edificação. Por isso, é de extrema importância integra-las nos escritórios de arquitetura, estimulando cada vez mais o seu uso.

Por fim, considerando o aumento de consumo de energia que vem acontecendo ano após ano, destaca-se a importância de tomar decisões que sejam assertivas, para além de produzir espaços confortáveis para seus usuários, produzir ambientes com conscientização sobre o consumo de energia.

## 5 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15220– 3: desempenho térmico de edificações residenciais. Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, ABNT, 2005.

KELLERT, S. R.; CALABRESE, E. F. Nature by Design: The Practice of Biophilic Design. New Have: Yale University Press, 2015.

LAMBERTS, R; DUTRA, L; PEREIRA, F. Eficiência Energética na Arquitetura. São Paulo: PW Editores. 1997.

Mello, Mario Fernando; Vinicius dos Santos, Eudes; Lunardi Dorneles, Ramires; Toneto da Costa, Grasielle; Rosa, Larissa; Kirchof Dias, Erica A IMPORTÂNCIA DE ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS APLICADAS NO PROJETO ARQUITETÔNICO Revista de Administração da Universidade Federal de Santa Maria, vol. 10, agosto, 2017, pp. 9-25 Universidade Federal de Santa Maria Santa Maria, Brasil. Disponível em <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=273452299002>

MENDES, N.; LAMBERTS, R.; NETO, J. A. B. C. Building simulation in Brazil. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 7., Rio de Janeiro. Proceedings... Rio de Janeiro: Building Simulation, 2001.

NASCIMENTO, A. C. da S.; COOPER, G. S.; ROCHA, A. P. de A. INSERÇÃO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO AMBIENTAL DE EDIFÍCIOS NO PROCESSO DE PROJETO DE ARQUITETURA. **Caderno PAIC**, [S. l.], v. 23, n. 1, p. 507–530, 2022. Disponível em: <https://cadernopaic.fae.edu/cadernopaic/article/view/509>. Acesso em: 15 dez. 2023.

SILVA, E. B. V. da; SOUZA, R. V. G. de. ANÁLISE E CONSIDERAÇÕES BIOCLIMÁTICAS DE UM PROJETO ARQUITETÔNICO NA ZONA 2, A PARTIR DO MÉTODO PRESCRITIVO DO RTQ-R. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020. Porto Alegre: ANTAC, 2020. p. 1–8. DOI: 10.46421/entac.v18i.775. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/775>. Acesso em: 31 jan. 2024.