

INSERÇÃO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO AMBIENTAL DE EDIFÍCIOS NO PROCESSO DE PROJETO DE ARQUITETURA

Ana Caroline da Silva Nascimento¹

Giovana Santana Cooper²

Ana Paula de Almeida Rocha³

RESUMO

Este trabalho propõe discutir a aplicação de simulação computacional de desempenho ambiental de edifícios no processo de projeto de arquitetura nos cursos de graduação e nos escritórios de Arquitetura. Os procedimentos metodológicos baseiam-se no estudo das principais ferramentas computacionais existentes, na aplicação de questionários para entendimento das dificuldades e potencialidades do uso da simulação na prática projetual, e na elaboração de um processo esquemático para uso da simulação na prática de projeto nos cursos de graduação e nos escritórios de arquitetura. Como resultado, nota-se que as universidades utilizam, nas aulas de conforto ambiental, *softwares* que geram análises básicas e poucas aplicam as ferramentas nas disciplinas de atelier. Os escritórios de arquitetura que adotam a simulação não se aprofundam no tema e geram principalmente análises com foco em iluminação. Por fim, foi elaborado um processo esquemático, para orientar arquitetos e universitários a implementar as simulações no processo de projeto, utilizando a ferramenta *Ladybug Tools*.

Palavras-chave: Simulação. Desempenho. Processo de Projeto

¹ Aluna do 7º período do curso de Arquitetura e Urbanismo da FAE Centro Universitário. Bolsista do Programa de Apoio à Iniciação Científica (PAIC 2021-2022). *E-mail*: nascimento.ana@mail.fae.edu

² Aluna do 9º período do curso de Arquitetura e Urbanismo da FAE Centro Universitário. Voluntária do Programa de Apoio à Iniciação Científica (PAIC 2021-2022). *E-mail*: giovana.cooper@mail.fae.edu

³ Orientadora da Pesquisa. Doutora em Engenharia Mecânica. Professora da FAE Centro Universitário. *E-mail*: ana.procha@fae.edu

INTRODUÇÃO

Atualmente, o contexto energético e ambiental das nossas cidades evidencia algumas preocupações que são inerentes à arquitetura. Os centros urbanos são responsáveis pelo consumo de 70% da energia disponível e por 40% das emissões de GEE (RIBEIRO; SANTOS, 2016). Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética “EPE”, (apud BRASIL, 2018), 51% do consumo de energia elétrica é atribuído a edifícios residenciais, comerciais e públicos. Isso revela a necessidade urgente de melhoria do desempenho de edifícios lidando com conceitos de arquitetura bioclimática e de eficiência energética em edificações.

A arquitetura bioclimática está baseada na adequação da arquitetura ao clima e ao contexto específico do local. Medidas passivas de condicionamento ambiental são aplicadas tomando partido os próprios elementos arquitetônicos, como fachadas, aberturas, materiais construtivos, sombreamento etc. A aplicação correta dessas estratégias bioclimáticas pode requerer do projetista estudos iniciais que contemplem as condições ambientais locais (temperatura do ar, umidade, radiação solar, ruído e qualidade do ar), bem como estudos mais avançados de avaliação do impacto das soluções de projeto no desempenho ambiental do edifício.

Diante da necessidade de incluir as questões de desempenho ambiental nos projetos de arquitetura, as simulações computacionais podem ser adotadas como ferramenta de avaliação de desempenho propriamente dito e de integração do processo projetual da arquitetura e da engenharia.

Como ferramenta de integração de projeto, o uso das simulações computacionais tem um papel relevante de evidenciar as vantagens de soluções verdadeiramente integradas entre arquitetura, engenharia e sistemas prediais (GONÇALVES; BODE, 2015). As certificações ambientais de edifícios têm popularizado o conceito de projeto integrativo, incluindo as simulações nesse processo. Diferentemente dos processos convencionais, que geralmente ocorrem de forma linear e independente entre os projetistas, o processo integrativo é fundamentalmente cíclico e colaborativo. Ele exige que toda a equipe avalie as decisões projetuais como um todo, enfatizando a comunicação entre os profissionais e as partes interessadas ao longo do ciclo de vida de uma construção. Nesse contexto, as simulações computacionais, principalmente quando integradas ao software de modelagem de engenharia e arquitetura, podem auxiliar na sinergia entre as diferentes disciplinas, permitindo análises integradas das soluções arquitetônicas direcionadas às necessidades ambientais do edifício.

O uso de ferramentas de simulação vem crescendo nos escritórios internacionais que priorizam a aplicação de recursos tecnológicos diversificados em seu processo projetual, tais como o inglês Foster + Partners e o italiano Mario Cucinella Architects (TRINDADE, 2006). Por sua vez, no Brasil, o emprego das simulações ainda é muito restrito. Em geral, 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.

Como alternativa para reverter essa situação, Scarazzato (1999) coloca que as simulações precisam fazer parte da etapa de ensino de graduação nos cursos de Arquitetura e Urbanismo. Isso auxilia os alunos a entenderem a importância da elaboração e execução de simulações nas diferentes fases de projeto, além de trazer maior consciência nas decisões arquitetônicas que são voltadas às questões ambientais, a partir da compreensão do impacto de cada solução projetual no desempenho térmico, lumínico e energético de uma edificação.

Nesse contexto, este trabalho se propõe a identificar o potencial do uso das ferramentas de simulação de desempenho ambiental nas diferentes fases de desenvolvimento de projeto, no âmbito dos cursos de graduação e dos escritórios de Arquitetura. Este projeto faz parte do Grupo de Pesquisa Interdisciplinar de Sustentabilidade e Tecnologia do Ambiente Urbano e Construído da FAE Centro Universitário – Curitiba/PR.

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1 PROCESSO DE PROJETO

O processo de projeto envolve algumas atividades que, independentemente do método de projeto escolhido pelo arquiteto, são comumente encontradas nas boas práticas profissionais. Em geral, essas atividades incluem a etapa de análise, síntese e avaliação. Na fase de análise, existem duas habilidades importantes a serem trabalhadas:

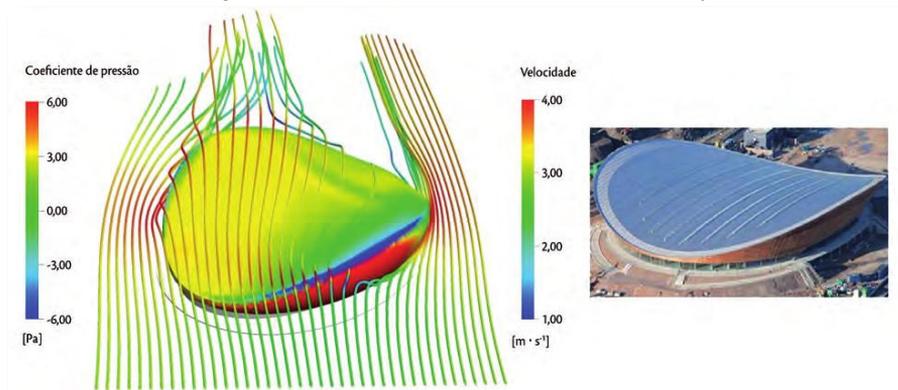
a formulação e a escolha da abordagem do problema. Nessa fase, o projetista deve ser capaz de compreender e descrever o problema, bem como de escolher um ponto de vista a partir do qual este será analisado. A etapa de síntese inclui o processo de criação e de representação de soluções arquitetônicas. Por último, na fase de avaliação, existem duas atividades principais: a avaliação propriamente dita e a ação de reflexão. O projetista precisa ser capaz de avaliar os aspectos objetivos e subjetivos do objeto arquitetônico bem como retomar a reflexão sobre as abordagens mais apropriadas para o projeto (KOWALTOWSKI et al., 2011).

Embora descrito de forma linear, o processo de projeto não é formado por uma sequência contínua de fases e sua aplicação não termina quando a análise, a síntese e avaliação já foram implementadas. Isto se deve ao fato de não ser possível seguir uma sequência pré-estabelecida de ações para elaboração de projetos práticos. Em aplicações reais, o processo linear é aplicado de forma cíclica, porque o projetista pode perceber na etapa de síntese, por exemplo, que alguns aspectos do projeto não foram analisados, influenciando os itens já concluídos, que agora precisam de correções (ANDRADE; RUSCHEL; MOREIRA, 2011). Desse modo, a sequência de atividades desenvolvidas deve permitir uma flexibilidade e interações cíclicas para obter resultados mais satisfatórios.

Outro método de projeto que está sendo amplamente implementado, desde a década de 1980 nos Estados Unidos, é o processo integrativo. Nele, o projeto arquitetônico começa a ser tratado como um objeto complexo, que precisa de planejamento, compatibilização entre as disciplinas e sinergia entre os profissionais, desde a concepção até a entrega do edifício (VIEIRA, 2017).

No processo integrativo, as simulações computacionais podem ser fundamentais para auxiliar os projetistas nas tomadas de decisões, a partir da comparação e identificação de soluções projetuais que possam proporcionar a melhoria do desempenho do edifício. Pode-se ter como exemplo o velódromo projetado pelo Hopkins Architects para as Olimpíadas de Londres, em 2012. Sua volumetria foi modelada com o auxílio de ferramentas computacionais para prever o comportamento dos ventos no interior e na envoltória do edifício (FIG. 1). Além disso, as simulações de desempenho térmico destacaram a importância de diminuir as áreas de superfície e criar um isolamento térmico para a cobertura, que se estivesse sido projetada com outra solução sem este isolamento, demandaria 18 vezes mais energia para controlar a temperatura interna do velódromo (GONÇALVES; BODE, 2015).

FIGURA 1 – Simulação do fluxo de ar no Velódromo das Olimpíadas de Londres

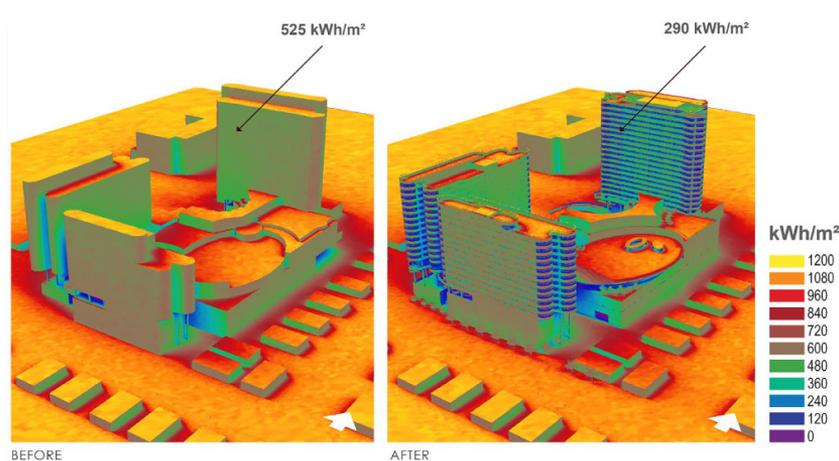


FONTE: Gonçalves e Bode (2015)

Em um concurso de arquitetura para um edifício multiuso em Anaheim, Califórnia, diferentes opções de elementos de sombreamento foram testadas para as áreas envidraçadas por meio de simulação computacional. Como resultado, o correto dimensionamento dos brises horizontais proporcionou uma redução de 45% nos ganhos solares da fachada Sul – que apresenta maior incidência solar direta na latitude da cidade (FIG. 2).

Incluir simulações computacionais no processo integrativo pode requerer mais tempo e maior colaboração entre os projetistas durante as primeiras fases de projeto, pois as decisões devem ser testadas e validadas em conjunto. Esse investimento inicial, no entanto, reduz o tempo gasto em fases mais avançadas (AIA, 2007). Além disso, ressalta-se que as intervenções para melhorar o desempenho do edifício vão se tornando mais caras e exigem maior esforço à medida que o projeto avança. Isso corrobora que as questões ambientais e energéticas devem ser discutidas preferencialmente nas fases iniciais de projeto, quando os projetistas possuem maior flexibilidade de atuação.

FIGURA 2 – Simulação da quantidade de radiação solar em um edifício antes e depois da aplicação de elementos de sombreamento



FONTE: AIA (2019)

1.2 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Os programas de simulação computacional de desempenho de edifícios buscam replicar, em um meio virtual, princípios da física ligados à construção. Existem diversos tipos de ferramentas computacionais (QUADRO 1) e cada uma se baseia em um fenômeno físico e gera resultados para uma determinada região ou construção. Vale ressaltar também que, em geral, todos os fenômenos observados nas simulações já foram analisados e validados em situações reais, através de estudos de caso (TRINDADE, 2006).

QUADRO 1 – Exemplos de programas de simulação computacional

Origem	Tipo de análise			
	Análise Climática	Iluminação natural e artificial	Ventilação Natural	Análise Termoenergética
Nacional	<i>Analysis BIO</i> <i>Sunpath</i> <i>SOL-AR</i>	<i>Apulux</i> <i>Troplux</i> <i>LUMO</i>	<i>FluxoVentos</i>	<i>Domus</i> <i>AvalCon-RIO</i> <i>UMIDUS</i>
Internacional	<i>Climate consultant</i>	<i>Radiance</i> <i>Insight</i> <i>Daysim</i> <i>Dialux</i> <i>Relux</i> <i>Ladybug</i> <i>AGI32</i> <i>Climate Studio</i>	<i>Ansys CFX</i> <i>CONTAM</i> <i>OpenFOAM</i>	<i>DesignBuilder</i> <i>eQUEST</i> <i>EnergyPlus</i> <i>ESP-r</i> <i>Green Building Studio</i> <i>IDA ICE</i> <i>IES Virtual Environment</i> <i>TRNSYS</i> <i>TRACE 3D Plus</i>

FONTE: Os autores (2022), baseado em Best Directory

Na maior parte dos casos, os softwares são desenvolvidos para gerar resultados baseados em apenas um tipo de análise, exigindo que os projetistas troquem de plataforma para a realização de análises multidisciplinares. Essa falta de comunicação e de fluxo contínuo de trabalho entre as ferramentas computacionais incentivou Mostapha Sadeghipour Roudsari a dar início ao *Ladybug Tools*, em 2012.

O pacote de ferramentas *Ladybug* apresenta um enorme potencial para a aplicação do processo integrativo. Ele possui ao todo quatro ferramentas: *Ladybug*, *Honeybee*, *Butterfly* e *Dragonfly*. A *Ladybug* permite a análise de arquivos climáticos como da carta solar, radiação, rosa dos ventos, entre outros. A *Honeybee* utiliza o *Radiance*, para avaliações de luz natural; e o *EnergyPlus/OpenStudio*, para análises térmicas e energéticas. A ferramenta *Butterfly* utiliza o motor de simulação *OpenFOAM* para a realização de simulações de ventilação natural. A *Dragonfly* utiliza os simuladores *Urban Weather Generator* e *CitySim* para a avaliação dos fatores climáticos em grande escala, como cidades.

As ferramentas do pacote *Ladybug* são conectadas à interface do *Grasshopper*, que por sua vez integra-se ao programa de modelagem *Rhinoceros*. Isso facilita a visualização dos resultados das simulações de forma dinâmica por meio de Gráficos e resultados numéricos na própria interface do *software* (LADYBUG TOOLS LLC, 2017-2021).

1.3 USO DAS SIMULAÇÕES NO PROCESSO DE PROJETO

A metodologia de ensino das disciplinas de atelier de projeto da maior parte dos cursos de Arquitetura e Urbanismo no Brasil não exploram os benefícios do uso do computador em sala de aula e a prática com programas de simulação é empregada apenas em exercícios isolados das disciplinas de conforto ambiental (DELBIN, 2006). Isso resulta em um conhecimento segregado, fazendo com que as estratégias bioclimáticas e de eficiência energética sejam pouco aplicadas em projeto e, quando aplicadas, dificilmente são testadas e validadas para o edifício diante das suas condições climáticas específicas (SOUZA et al., 2021).

Alguns pesquisadores têm desenvolvido experiências de ensino combinando as simulações no exercício projetual. Essas experiências têm mostrado que as dificuldades encontradas pelos estudantes para as tomadas de decisão podem ser resolvidas com a utilização de simulação durante o processo de projeto. Além disso, os estudantes reconhecem a aquisição de maior autonomia e confiança para a elaboração de projetos futuros (REINHART et al., 2012, 2015; SOUZA et al., 2021).

No mercado de trabalho, a crescente preocupação com o desempenho dos edifícios começou a influenciar os escritórios de arquitetura, para que adotem a simulação como etapa fundamental no processo de projeto. Problemas que eram resolvidos apenas com base na experiência dos projetistas, podem ter sua qualidade comprovada e fornecer informações seguras sobre o desempenho ambiental do edifício (MEUSEL, 2016).

Alguns autores discutem novas metodologias de projeto baseadas no desempenho ambiental do edifício. Por exemplo, Strunge et al. (2014) desenvolveu um método de simulação de iluminação natural e desempenho energético integrado a um software de modelagem de arquitetura que possa ser aplicado sem qualquer interferência drástica ou modificação dos processos de projeto arquitetônicos predominantes. Outro exemplo, utilizando-se de avanços tecnológicos, Costa et al. (2021) propôs uma metodologia de

projeto performativo que relaciona modelagem paramétrica, otimização e avaliação de desempenho energético para edifícios de escritórios.

Grande parte das metodologias abordam o uso das simulações nas fases iniciais de projeto (ØSTERGARD et al., 2016), no entanto, a prática das avaliações computacionais também se mostra relevante nas fases mais avançadas, bem como nas etapas de construção e de operação dos edifícios. Diante disso, em 2018, foi publicada a norma americana *ASHRAE Standard 209* (ANSI/ASHRAE, 2018) que fornece requisitos mínimos para o processo de simulação de edifícios, bem como orientações sobre o papel das simulações em cada estágio do processo de projeto, incluindo planejamento, projeto, construção e operação. Especificamente, descrevem-se onze ciclos de simulação aliados às diferentes fases do projeto, desde a concepção à operação do edifício. Dentre esses ciclos, sete referem-se à etapa de concepção do edifício, enquanto os demais estão relacionados às etapas de construção, operação e pós-ocupação. Essa norma procura estabelecer uma linguagem comum entre arquitetos e simuladores, reforçando o conceito de processo integrativo para todo o ciclo de vida da edificação.

A norma também discute o nível de detalhamento dos modelos de simulação para cada estágio de projeto, construção e operação do edifício. De fato, o nível de detalhamento deve ser coerente ao tipo de problema que se deseja avaliar para a fase específica. Isso exige planejamento da simulação, da modelagem do edifício e definição de dados de saída coerentes ao propósito da simulação (HENSEN; LAMBERTS, 2011).

A elaboração de novas normativas e metodologias de projeto baseado em desempenho se mostra fundamental para contornar algumas limitações para a adoção das simulações na prática de projeto. Conforme observadas por Tian et al. (2018), as principais limitações estão relacionadas com o longo tempo de cálculo, a carência de divulgação e de métodos padronizados. No caso da realidade brasileira, Meusel e Westphal (2017) apontam que as maiores barreiras para a adoção de simulação computacional nos escritórios de arquitetura são: (i) o alto nível de conhecimento necessário para utilizar as ferramentas de simulação, (ii) a necessidade de conhecimentos específicos sobre física aplicada e (iii) a baixa interoperabilidade entre os programas de desenho e os de simulação.

Nesse contexto, pode-se concluir que as novas metodologias devem prever o uso de ferramentas apropriadas para cada fase do projeto. Além disso, elas devem fornecer respostas adequadas e válidas para os problemas específicos dos projetistas, além de ser flexível o suficiente para acomodar um processo de projeto em rápida mudança.

2 METODOLOGIA

A discussão do potencial do uso das ferramentas de simulação no desenvolvimento de projetos arquitetônicos foi realizada a partir de um levantamento dos softwares mais utilizados nos cursos de graduação e da aplicação de um questionário junto aos escritórios de arquitetura. Além disso, a partir do estudo das ferramentas do *Ladybug*, foi elaborado um processo esquemático para avaliação do desempenho ambiental das edificações.

2.1 UNIVERSIDADES

Para coletar os dados das universidades, uma pesquisa foi realizada nos sites oficiais das instituições de ensino, com o objetivo de identificar as características das disciplinas com enfoque em conforto ambiental. Em particular, foram levantados os dados sobre a carga horária dessas disciplinas, suas ementas e quais softwares são utilizados como ferramenta de ensino para prever o desempenho ambiental dos edifícios.

A principal dificuldade desta etapa foi encontrar informações completas nos sites das universidades, sendo que algumas não disponibilizam nenhum tipo de informação. Por isso, adotou-se uma nova estratégia para completar os dados ausentes, a partir do contato com os professores universitários. Foram criadas tabelas de cada universidade com as seguintes informações: se possui acesso ao plano de ensino, as disciplinas ofertadas, ferramentas computacionais utilizadas, as principais atividades usando as ferramentas de simulação, se a classificação era obrigatória ou optativa, carga horária e os objetivos das disciplinas relacionadas a desempenho ambiental.

2.2 ESCRITÓRIOS DE ARQUITETURA

A segunda etapa da metodologia envolve a coleta de informações junto aos escritórios de arquitetura. Para isso, um questionário foi elaborado com intuito de entender como eles estão implementando as simulações para prever o desempenho dos edifícios e, se não estiverem, quais são as principais razões.

O questionário foi dividido em 3 seções (QUADRO 2), sendo elas: seção 1, com sete perguntas gerais; seção 2, com oito perguntas específicas para os escritórios que

utilizam as ferramentas de simulação; e seção 3, com 5 perguntas específicas para os escritórios que não utilizam estas ferramentas. A última questão da seção 1 é uma pergunta norteadora, que define se o respondente será redirecionado para a seção 2 ou 3, antes de finalizar o questionário.

QUADRO 2 – Organização do questionário enviados aos escritórios de arquitetura

SEÇÕES	ASSUNTO DAS QUESTÕES
(Seção 1) Perguntas Gerais	<ul style="list-style-type: none"> • Localização • Características do escritório • Processo de projeto usado • Nível de conhecimento sobre simulação • Uso de estratégias bioclimáticas na elaboração de projetos • Uso de simulação para prever o desempenho dos edifícios (questão norteadora)
(Seção 2) Escritórios que fazem uso de simulação	<ul style="list-style-type: none"> • Como e porque o escritório adotou o uso de simulação • Frequência de uso das ferramentas computacionais • O escritório faz simulação ou terceiriza o serviço • Tipos de análises desenvolvidas • Auxílio das simulações nas decisões projetuais
(Seção 3) Escritórios que não fazem uso de simulação	<ul style="list-style-type: none"> • Solicitação dos clientes pelo serviço de simulação • Interesse do escritório em simulação para prever o desempenho dos edifícios • Barreiras e possíveis vantagens do uso

FONTE: Os autores (2022)

2.3 PROCESSO ESQUEMÁTICO USANDO O LADYBUG

A última etapa consiste na elaboração de um processo esquemático do uso da simulação nas diferentes fases do projeto. Para isso, foi feito um levantamento e uma categorização de 44 *softwares* de simulação para analisar as possibilidades de uso e as melhores opções para a criação de um processo esquemático. Sendo assim, o *software* com maior capacidade de oferecer os resultados esperados é o *Ladybug/Rhino*. Esta ferramenta computacional oferece diversos tipos de simulação em apenas uma plataforma, onde as mesmas podem ser geradas a partir de gráficos 2D ou 3D, além disto, podem ser feitos estudos envolvendo luz solar, sombra nas edificações, conforto térmico, energia, entre outros.

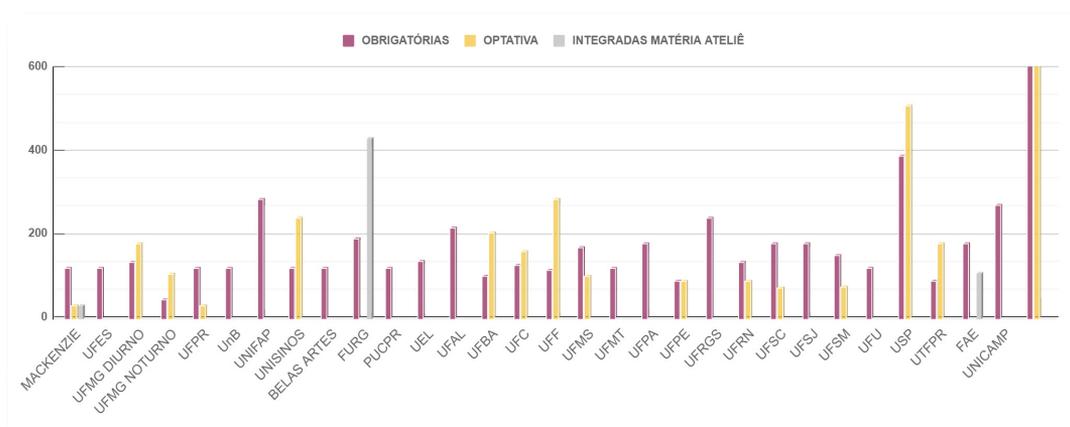
3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 RESULTADO DO LEVANTAMENTO REALIZADO JUNTO ÀS UNIVERSIDADES

A seguir estão apresentadas as informações encontradas para o uso das simulações computacionais nos cursos de Arquitetura e Urbanismo, incluindo as cargas horárias das disciplinas relacionadas a conforto ambiental, bem como as ferramentas de simulação mais utilizadas em sala de aula.

O GRÁF. 1 mostra os resultados relacionados a carga horária das disciplinas na temática de desempenho ambiental. A faculdade que apresentou mais horas foi a USP, com 900 horas ao todo em matérias obrigatórias e optativas. A média da carga horária nas disciplinas obrigatórias das 30 universidades listadas foi cerca de 156 horas. Apenas metade das universidades contam com disciplinas optativas relacionadas a conforto.

GRÁFICO 1 – Soma carga horária de matérias obrigatórias e optativas relacionadas a desempenho ambiental em universidades brasileiras



FONTE: Os autores (2022)

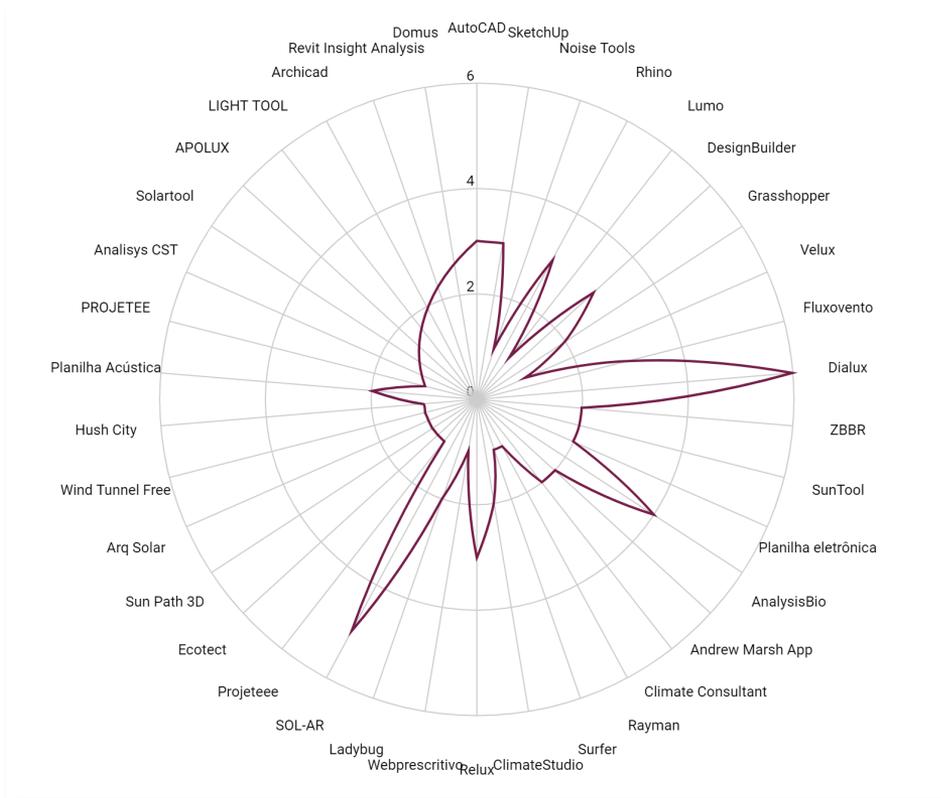
Dentre o uso de simulação por faculdade, o software mais utilizado constatado foi o Dialux, Sol-ar e AnalysisBio (GRAF. 2).

Entretanto, considerando que um software pode ser utilizado em diferentes disciplinas de uma mesma faculdade, além do Dialux, Sol-ar e AnalysisBio, também se destaca o uso do SketchUp, planilhas eletrônicas, Climate Consultant, Autocad e Relux (GRAF. 3).

Em termos gerais, os resultados indicam que as ferramentas computacionais mais utilizadas nos cursos de Arquitetura e Urbanismo estão voltadas para as análises das condicionantes climáticas locais (Climate Consultant, Sol-ar, Analysis Bio) e para as simulações de iluminação natural (Dialux, Relux). Isso reforça a necessidade de

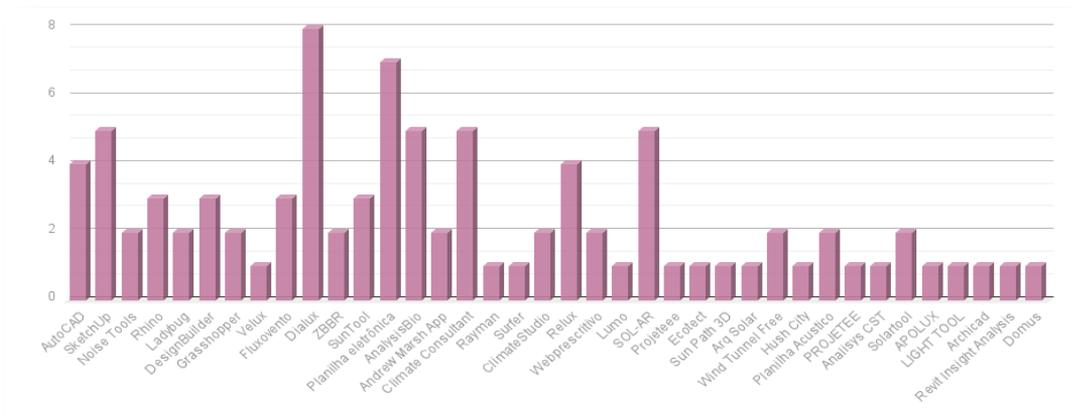
aprofundar os conceitos de física aplicada, como transferência de calor, para aumentar a frequência de uso de ferramentas computacionais relativas ao desempenho termoenergético das edificações.

GRÁFICO 2 – Uso dos softwares de desempenho ambiental nas faculdades



FONTE: Os autores (2022)

GRÁFICO 3 – Quantidade do uso de simulação computacional de desempenho ambiental nas matérias das faculdades



FONTE: Os autores (2022)

3.2 RESULTADOS DO LEVANTAMENTO REALIZADO JUNTO AOS ESCRITÓRIOS DE ARQUITETURA

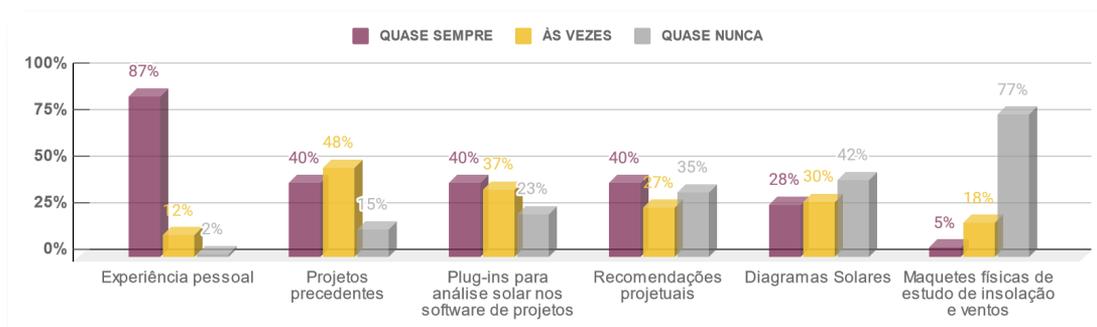
De acordo com o CAU (Conselho de Arquitetura e Urbanismo do Brasil, 2021), existem mais de 30 mil empresas de arquitetura e urbanismo registradas no país. O questionário foi enviado a diversos escritórios de todas as regiões do país (em média 400), recebendo ao todo 60 respostas. Dentre os dados levantados, a maior parte das respostas foram de escritórios da região Sul, com 65%. Seguidos das regiões Sudeste (com cerca de 17%), Nordeste (com 10%), Norte (com cerca de 7%) e Centro-Oeste (com cerca de 2%). Em relação ao tempo de formação dos escritórios entrevistados, 30% afirmou ter de 1 a 5 anos, consecutivo aos estabelecimentos de 10 a 20 anos que formaram uma parcela de cerca de 28% dos respondentes e entre 5 a 10 anos com cerca de 23%.

Quase metade dos entrevistados afirmam possuir uma equipe de 2 a 5 pessoas, nos quais entre os projetos mais elaborados pelos escritórios estão os residenciais, de interiores, reformas e comerciais, respectivamente.

Conforme apresentado no GRAF. 4, no que diz respeito à frequência de uso de métodos/ferramentas para implementação das estratégias bioclimáticas nos projetos, a maior parte dos respondentes (87%) afirmou que utiliza a experiência pessoal como método. No entanto, outros métodos podem ser destacados, como projetos precedentes, plugins para análise e recomendações projetuais. Já as maquetes físicas são quase nunca utilizadas como uma ferramenta projetual.

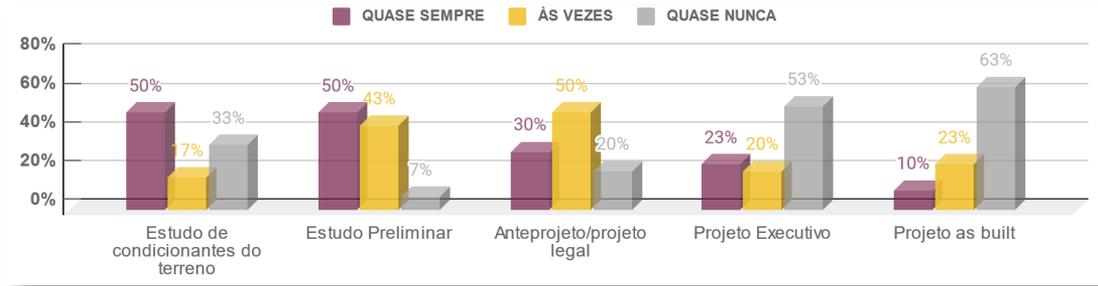
Com relação à frequência que as simulações são utilizadas nas diferentes fases de projeto (GRAF. 5), nota-se uma predominância do seu uso nas etapas mais iniciais, sendo elas no estudo de condicionante do terreno e preliminar. Por outro lado, as simulações são menos utilizadas nas fases de projeto executivo e as built.

GRÁFICO 4 – Frequência de uso de métodos/ferramentas para implementação das estratégias bioclimáticas nos projetos arquitetônicos



FONTE: Os autores (2022)

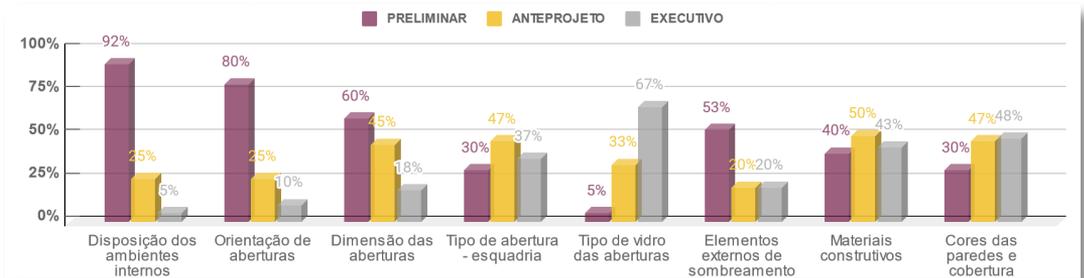
GRÁFICO 5 – Frequência que as simulações computacionais são utilizadas nas fases de projeto



FONTE: Os autores (2022)

O GRÁF. 6 mostra quais elementos arquitetônicos são projetados e/ou especificados em cada fase de projeto, dando destaque à disposição dos ambientes internos e orientação das aberturas na fase preliminar; materiais construtivos, cores da parede e tipo de abertura na fase de anteprojeto; e tipo de vidro das aberturas na fase de projeto executivo.

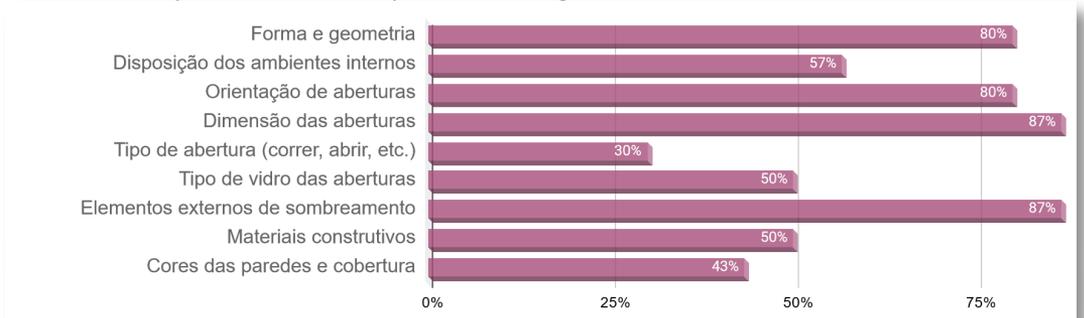
GRAF. 6 – Fase de projeto que os elementos arquitetônicos são projetados e/ou especificados



FONTE: Os autores (2022)

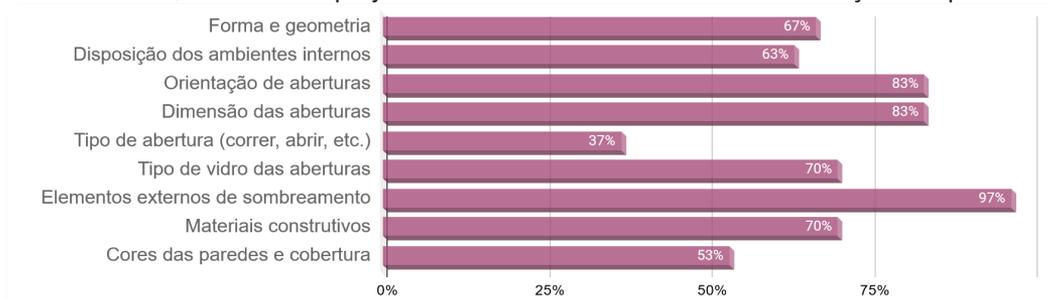
Os Gráficos 7 e 8 apresentam como os escritórios enxergam as potencialidades de uso das simulações para as tomadas de decisão de projeto. Em específico, o GRAF. 7 indica resultados dos escritórios que utilizam as simulações, e o GRAF. 8, dos escritórios que não utilizam as simulações. Em ambos os casos, os respondentes destacam principalmente ao tratamento das aberturas, incluindo suas dimensões, orientação e elementos de sombreamento.

GRÁFICO 7 – As simulações computacionais interferem/auxiliam nas decisões projetuais de quais elementos arquitetônicos segundo os escritórios



FONTE: Os autores (2022)

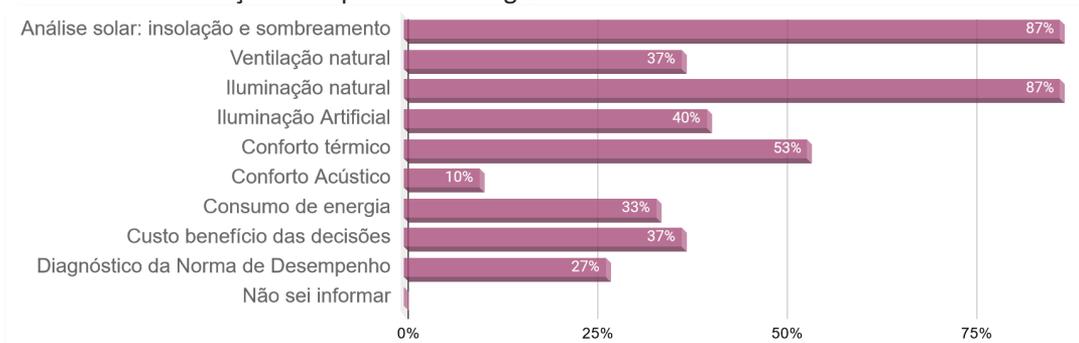
GRÁFICO 8 – Quais decisões projetuais os escritórios fariam uso de simulação computacional



FONTE: Os autores (2022)

Com relação ao tipo de análises, o GRÁF. 9 mostra que as simulações de insolação e de iluminação natural são as mais empregadas pelos escritórios de arquitetura, com 87%, reforçando o potencial de estudo das aberturas e seus elementos de sombreamento.

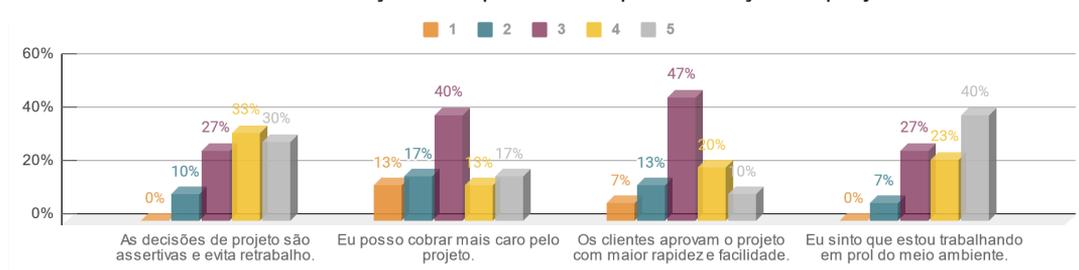
GRÁFICO 9 – Quais resultados e tipos de análise de projeto são desenvolvidos por meio das simulações computacionais segundo os escritórios



FONTE: Os autores (2022)

O GRÁF. 10 mostra o nível de concordância (sendo: 5 concordo totalmente e 1 discordo totalmente) para diferentes declarações relativas ao motivo de adotar as simulações computacionais para a avaliação do projeto. O trabalho em prol do meio ambiente se mostrou a principal motivação para o uso das simulações, contrastando com a declaração de que os clientes aprovam o projeto com maior rapidez e facilidade, no qual possuiu apenas 10% de concordância (5).

GRÁFICO 10 – Qual o nível de concordância das declarações a seguir quando os escritórios adotam as simulações computacionais para avaliação do projeto

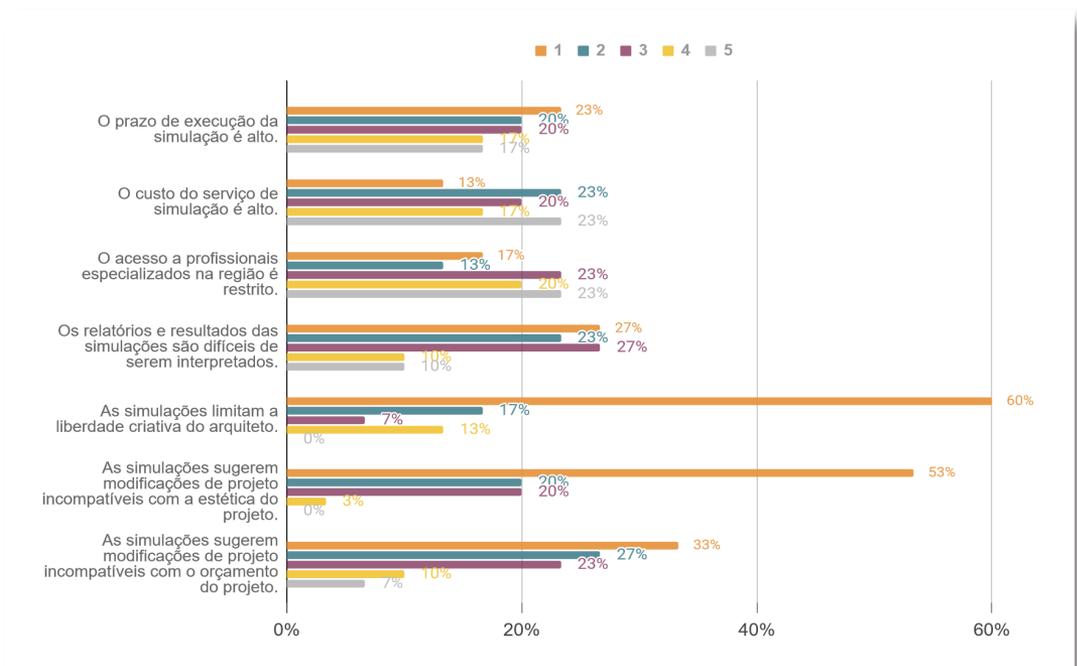


FONTE: Os autores (2022)

O questionário também ajudou a traçar as barreiras do uso extensivo das simulações entre os respondentes que utilizam (GRAF. 11) e os que não utilizam as simulações computacionais (GRAF. 12).

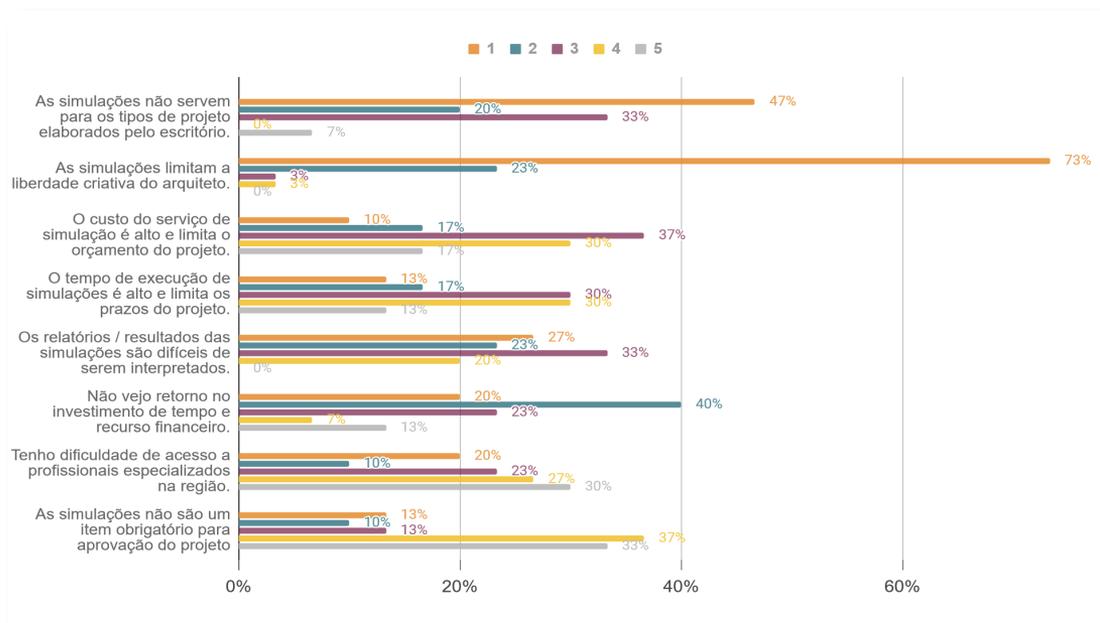
Por parte dos que usufruem das simulações, os elevados custos, longos prazos de execução e o acesso restrito a profissionais especializados na região foram indicados como as principais barreiras para o uso extensivo das ferramentas (GRAF. 11). Já por parte dos escritórios que não utilizam simulações, as declarações que tiveram uma maior concordância foram que as simulações não são um item obrigatório para a aprovação de projeto e o acesso restrito a profissionais especializados na região (GRAF. 12). Outro ponto que merece destaque é que os dois grupos de respondentes discordam que as simulações limitam a liberdade criativa do arquiteto e que sugerem modificações arquitetônicas incompatíveis com a estética do projeto.

GRÁFICO 11 – Relação das barreiras do uso extensivo das simulações dos escritórios que utilizam simulação computacional



FONTE: Os autores (2022)

GRÁFICO 12 – Relação das barreiras do uso das simulações dos escritórios que não utilizam simulação computacional



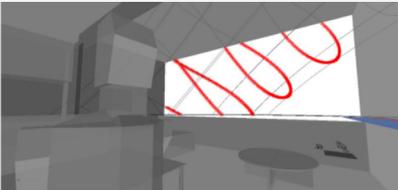
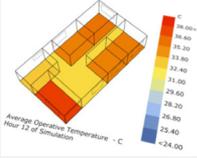
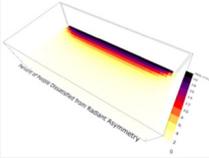
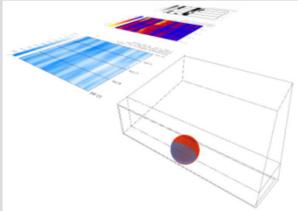
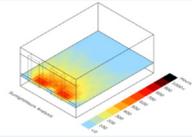
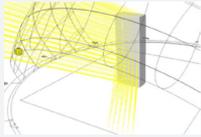
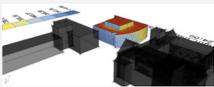
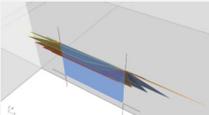
FONTE: Os autores (2022)

3.3 ESQUEMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE PROJETO COM O LADYBUG TOOLS

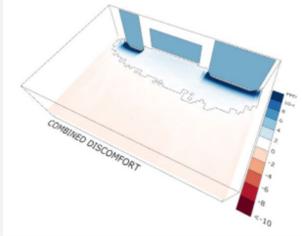
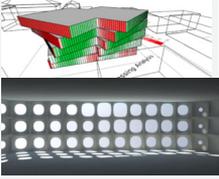
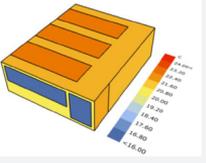
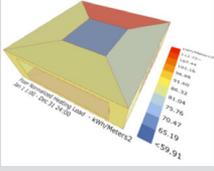
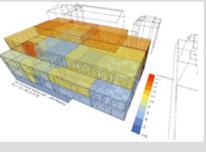
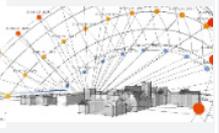
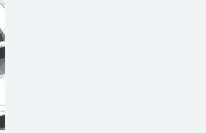
Para esquematizar um processo de projeto usando o software *Ladybug Tools*, foi necessário identificar as potencialidades de simulação oferecidas pela ferramenta. O QUADRO 3 apresenta as análises que podem ser feitas no processo esquemático, incluindo diferentes escalas e níveis de detalhamento do projeto.

Em um processo esquemático, a primeira etapa consiste no estudo do clima local, a segunda está relacionada à interação entre o edifício e seu entorno imediato, através da sua envoltória, e a última fase aborda avaliações das condições ambientais internas, incluindo análises de temperatura e de comportamento do sol no interior do edifício.

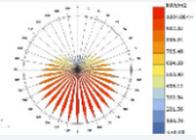
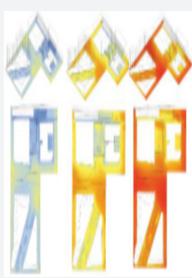
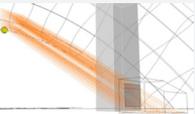
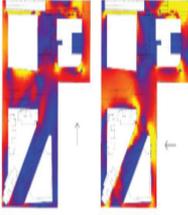
QUADRO 3 – Simulações que podem ser realizadas no processo esquemático usando o *Ladybug Tools*
continua

TIPO DE ANÁLISE	NÍVEL DE DETALHAMENTO			
	INICIAL		AVANÇADO	
AMBIENTE	<p>FIGURA 3 – Análise do comportamento do sol no interior de um edifício (2015)</p> 		<p>FIGURA 4 – Uma análise usando cores para medir a temperatura interna de ambientes (2018)</p> 	<p>FIGURA 5 – Criação de um mapa espacial de desconforto, feito junto com o <i>EnergyPlus</i> (2016)</p> 
			<p>FIGURA 6 – Desconforto da assimetria radiante usando os resultados da temperatura de uma simulação do <i>EnergyPlus</i> (2016)</p> 	
ENVELOPE	<p>FIGURA 7 – Medir a Exposição solar anual na geometria de um edifício (2017)</p> 	<p>FIGURA 8 – Medir o reflexo dos raios de sol na fachada de um edifício (2015)</p> 	<p>FIGURA 9 – Análise da radiação solar nas fachadas de um edifício (2015)</p> 	<p>FIGURA – 10 Cálculos de sombreamento para criar bloqueios do sol na geometria (2015)</p> 

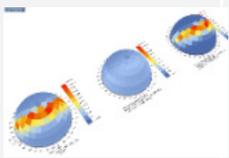
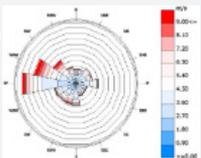
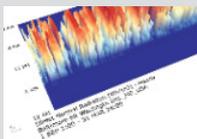
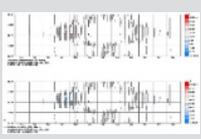
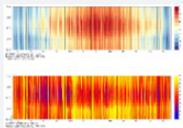
QUADRO 3 – Simulações que podem ser realizadas no processo esquemático usando o *Ladybug Tools*
continua

TIPO DE ANÁLISE	NÍVEL DE DETALHAMENTO							
	INICIAL		AVANÇADO					
ENVELOPE	<p>FIGURA 11 – Medir o impacto da geometria do envidraçamento no conforto térmico dos ocupantes (2017)</p> 		<p>FIGURA 12 – Colaboração entre <i>Ladybug</i> e <i>Skin Designer</i> para gerar estudo de radiação (2017)</p> 		<p>FIGURA 13 – Personaliza a construção de várias superfícies em zonas termicamente ativas (2018)</p> 			
			<p>FIGURA 14 – Criação de um modelo de energia com a colaboração entre <i>Honeybee</i> e <i>EnergyPlus</i> (2015)</p> 		<p>FIGURA 15 – Criação de um modelo de energia e luz usando modelagem feita no <i>software Revit</i> (2018)</p> 			
CLIMA	<p>FIGURA 16 – Mapa do conforto solar de um ano em uma região (2015)</p> 		<p>FIGURA 17 – Obter os dados climáticos da região usando a ferramenta de caminho do sol (2015)</p> 		<p>FIGURA 18 – Análise de um intervalo de sombras em área urbana com vários edifícios altos (2015)</p> 		<p>FIGURA 19 – Animação de vistas do sol para medir as condições de brilho interno ao longo do dia em ambientes (2017)</p> 	

QUADRO 3 – Simulações que podem ser realizadas no processo esquemático usando o *Ladybug Tools*
continua

TIPO DE ANÁLISE	NÍVEL DE DETALHAMENTO			
	INICIAL		AVANÇADO	
CLIMA	<p>FIGURA 20 – Análises usando diagrama de caminho do sol (2015)</p> 	<p>FIGURA 21 – Rosa de radiação solar (2015)</p> 	<p>FIGURA 22 – Fluxo de ar externo medido através de uma análise de padrões de vento (2021)</p> 	<p>FIGURA – 23 Análise de conforto térmico ao ar livre gerado com <i>Butterfly</i>, <i>Ladybug</i> e <i>Honeybee</i> (2021)</p> 
	<p>FIGURA 24 – Analisar o traçado dos raios solares (2015)</p> 	<p>FIGURA 25 – Adicionar contexto urbano à rosa de radiação (2015)</p> 		

QUADRO 3 – Simulações que podem ser realizadas no processo esquemático usando o *Ladybug Tools* conclusão

TIPO DE ANÁLISE	NÍVEL DE DETALHAMENTO		
	INICIAL	AVANÇADO	
	<p>FIGURA 26 – Análises solares usando a funcionalidade de criar cúpulas do céu (2015)</p> 	<p>FIGURA 27 – Rosa dos ventos de uma região (2015)</p> 	
	<p>FIGURA 28 – Resultados usando os dados climáticos de um período (2015)</p> 	<p>FIGURA 29 – Dados climáticos com ferramenta de instrução (2015)</p> 	
	<p>FIGURA 30 – Visualizar em gráfico 3D os dados meteorológicos (2015)</p> 	<p>FIGURA 31 – Animação em tempo real da radiação urbana (2015)</p> 	

FONTE: Os autores (2022), baseado em LADYBUG TOOLS LLC

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o objetivo de identificar o potencial do uso das ferramentas de simulação de desempenho ambiental nas diferentes fases de desenvolvimento de projeto, no âmbito dos cursos de graduação e dos escritórios de Arquitetura, este trabalho adotou como metodologia a realização de um levantamento dos *softwares* mais utilizados nos cursos de graduação e da aplicação de um questionário junto aos escritórios de arquitetura. Além disso, para criar um processo esquemático que possa auxiliar na elaboração de projetos arquitetônicos, as ferramentas computacionais pertencentes ao *Ladybug/Rhino* foram selecionadas por apresentarem maior potencial de análises climáticas em uma única plataforma.

Durante a análise dos resultados, ficou evidente que as universidades precisam aprofundar os conceitos de física aplicada e adicionar uma maior variedade de *softwares* para os alunos aprenderem a criar análises bioclimáticas com maior eficiência. Atualmente, os *softwares* mais utilizados em âmbito nacional nas universidades são: Dialux, Sol-ar e *Analysis Bio*.

Os dados obtidos junto aos escritórios de arquitetura mostraram que 87% dos participantes usam apenas a experiência pessoal como método/ferramenta para implementação das estratégias bioclimáticas nos projetos. Além disso, a maioria dos profissionais que utilizam algum tipo de ferramenta computacional restringem o seu uso apenas às etapas iniciais do processo de projeto, para estudos de insolação e iluminação natural.

Embora a simulação computacional de desempenho ambiental de edifícios possibilite avaliar soluções projetuais de forma integrada, auxiliando na comparação de diferentes opções de projeto antes da construção do edifício, este trabalho mostrou que a sua aplicação é ainda bastante restrita nos cursos de graduação e nos escritórios de Arquitetura. Ressalta-se ainda a necessidade de aprofundamento dessa temática para elaboração de um processo de simulação integrado ao exercício projetual. Desse modo, espera-se promover o uso das simulações computacionais como forma de se reduzir os impactos ambientais e energéticos das edificações.

Durante o desenvolvimento deste trabalho ficou evidente que para desenvolver com mais precisão um método de aplicação de simulações computacionais no processo de projeto de arquitetura, usando a ferramenta *Ladybug/Rhino*, é necessário criar simulações e testar os limites do *software*. Sendo assim, sugerimos o desenvolvimento dessa problemática em estudos futuros.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, Max L. V. X.; RUSCHEL, Regina Coeli; MOREIRA, Daniel de Carvalho. O processo e os métodos. In: KOWALTOWSKI, Doris K. et al. (Org.). **O processo de projeto em arquitetura**: da teoria à tecnologia. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. p. 80-101.
- BEST DIRECTORY. Building Energy Software Tools. **International Building Performance Simulation Association**. 2014. Disponível em: <https://www.buildingenergysoftwaretools.com>. Acesso em: 3 jul. 2022.
- BRASIL. Ministério de Minas de Energia. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2018**. Brasília: EPE, 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2018vf.pdf>. Acesso em: 3 set. 2022.
- CONSELHO DE ARQUITETURA E URBANISMO DO BRASIL (CAU). **Novo IGEO**. 2021. Disponível em: <https://gisserv.caubr.gov.br/arcgis/apps/sites/#/novoigeo/>. Acesso em: 2 jul. 2022.
- COSTA, Lucas Martinez; ALVAREZ, Cristina Engel; MARTINO, Jarryer Andrade. Proposta de método de projeto baseado no desempenho para edifícios energeticamente eficientes. **Ambiente Construído**, São Paulo, v. 21, n. 2, p. 409-433, abr./jun. 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/95xwmsf99rHJ7cFHvy7cRcM/?lang=pt#>. Acesso em: 3 jul. 2022.
- DELBIN, Simone. **Inserção de simulação computacional de conforto ambiental de edifícios em ensino de projeto arquitetônico**: proposta de metodologia. 2006. Dissertação (Mestrado de Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2006.
- GONÇALVES, Joana Carla Soares; BODE, Klaus. **Edifício ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.
- HENSEN, Jan L. M.; LAMBERTS, Roberto (Ed.). **Building Performance Simulation for Design and Operation**. Londres: Spon, 2011.
- KOWALTOWSKI, Doris K. et al. (Ed.). **O processo de projeto em arquitetura**: da teoria à tecnologia. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.
- LADYBUG TOOLS LLC. **Ladybug Tools**. 2017-2021. Disponível em: <https://www.ladybug.tools/>. Acesso em: 30 jun. 2022.
- MEUSEL, Marina Dal Zot von. **Investigação da simulação computacional de desempenho energético integrada às etapas iniciais do processo de projeto**. 2016. 207 f. Dissertação (Mestrado de Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- MEUSEL, Marina Dal Zot von; WESTPHAL, Fernando. Barreiras para a introdução de simulação computacional à prática de projeto arquitetônico: o caso de um edifício institucional em Curitiba – PR. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 14., 2017, Balneário Camboriú. **Anais...** Balneário Camboriú: ENCAC, 2017.
- ØSTERGÅRD, Torben; JENSEN, Rasmus L.; MAAGAARD, Steffen E. Building simulations supporting decision making in early design – a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Aarhus. v. 61, p. 187-201, ago. 2016.
- RIBEIRO, Suzana Kahn; SANTOS, Andrea Souza (Eds.). **Mudanças climáticas e cidades**: relatório especial do painel brasileiro de mudanças climáticas. Rio de Janeiro: PBMC, COPPE – UFRJ, 2017. Disponível em: http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/documentos/Relatorio_UM_v10-2017-1.pdf. Acesso em: 05 set. 2022.

REINHART, Christoph F. et al. Learning by playing – Teaching energy simulation as a game. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 5, n. 6, p. 359-368, Nov. 2012.

REINHART, Christoph F.; DOGAN, Timur. Lessons Learned from a simulation – Based approach to teaching building science to designers. In: BUILDING SIMULATION, 2015, Cambridge. **Proceedings from Building Simulation**. Hyderabad: MIT, 2015. p. 1126-1133.

SCARAZZATO, P. S. Recursos computacionais aplicados ao ensino do conforto térmico em arquitetura – CTCA: conforto térmico, cálculo e análise. In: ENCAC, 5., 1999. Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ANTAC, 1999.

SILVA, Isabella Romeiro da; SOLER, Isabelle Silva Martins; DORTA, Julia Oliveira. **Guia de estudos:** Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. Campinas: PNUMA; FAMUN, 2016. Disponível em: https://famun.com.br/2016/em/wp-content/uploads/2016/05/FAMUN-2016_Guia-B_PNUMA-1.pdf. Acesso em: 28 set. 2022.

SOUZA, Larissa P. de; LAMBERTS, Roberto; VAZ, Carlos E. Verzola. Building performance simulation as a guide to design decision making: an analysis of architecture student's design process. In: CONFERÊNCIA DE SIMULAÇÃO DE CONSTRUÇÃO, 2021, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: UFSC, 2021. p. 9.

STRUNGE, Jon et al. Method for Integrating Simulation-Based Support in the Building Design Process. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON DESIGN AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING, 2014, Copenhagen. **Proceedings...** Copenhagen: IJEEE, 2014. v. 3.

THE AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS (AIA). **An Architect's Guide to Integrating Energy Modeling in the Design Process**. Califórnia: AIA National, 2012. Disponível em: <https://content.aia.org/sites/default/files/2016-04/Energy-Modeling-Design-Process-Guide.pdf>. Acesso em: 28 set. 2022.

THE AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS (AIA). **Integrated project delivery: a guide**. Califórnia: AIA National, 2007. Disponível em: https://zdassets.aiacontracts.org/ctrzdweb02/zdpdfs/ipd_guide.pdf. Acesso em: 28 set. 2022.

TIAN, Zhinchao. Towards adoption of building energy simulation and optimization for passive building design: a survey and a review. **Energy and Buildings**, Nanjing, v. 158, p. 1306-1316, jan. 2018.

TRINDADE, Sileno Cirne. **Simulação computacional como ferramenta de auxílio ao projeto:** aplicação em edifícios naturalmente ventilados no clima de Natal/RN. 2006. Dissertação (Mestrado de Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

VIEIRA, Patrícia. O que é Processo Integrativo e a sua importância em projetos eficientes. **UGREEN**, Curitiba, 6 out. 2017. Disponível em: <https://www.ugreen.com.br/processo-integrativo>. Acesso em: 1 jul. 2022.